الدكتورة
سميرة الحصري
أستاذة في كلية العلوم
جامعة دمشق

# الجيولوجيا الفيزيائية

- ٢ -




١٤١٨ - ١٤١٩ هـ
١٩٩٧ - ١٩٩٨ م

منشورات جامعة دمشق

الدكتورة
سميرة الحصري
أستاذة في كلية العلوم
جامعة دمشق

# الجيولوجيا الفيزيائية

- ٢ -



منشورات جامعة دمشق

١٤١٨ - ١٤١٩هـ

١٩٩٧ - ١٩٩٨م

# المنهاج النظري لمقرر الجيولوجيا (٢)

## لطلاب السنة الأولى للعلوم الجيولوجية

## العوامل الخارجية المؤثرة في القشرة الأرضية

- التجوية وتشكل الترب
- تبدد الكتل
- المياه الجارية السطحية.
- المياه الجوفية
- الجليديات
- الرياح والصحارى
- المحيطات والبحار
- البحيرات والمستنقعات

## العوامل الداخلية المؤثرة في القشرة الأرضية

- الزلازل
- البراكين
- تشوه الصخور وتشكل الجبال

# مُقَدِّمَة

## الطبعة الأولى

تعد الجيولوجيا الفيزيائية مدخلا لدراسة علوم الأرض، فهي تهم بالدرجة الأولى كل الراغبين في الافادة من هذا العلم، لأنها تزودهم بالمفاهيم الأساسية للجيولوجيا، وتجعلهم ينظرون إلى الطبيعة المحيطة نظرة علمية ثاقبة، تساعدهم على فهم تشكل القشرة الأرضية، وملاحقة تطوراتها من خلال العوامل الخارجية التي تقع تحت ملاحظتنا المباشرة، بالإضافة إلى العوامل الداخلية التي تنعكس بأحداث وظواهر خارجية كالهزات الأرضية والحادثات البركانية، كما تساعدهم على تفهم انعكاس هذه العوامل على طبيعة الصخور وتشكلها.

ونظرا لأن منهاج الجيولوجيا الفيزيائية واسع للغاية، فقد كان الاكتفاء بمعالجة الفصول الرئيسة بإيجاز أمراً ضرورياً، ليتسنى للطالب فهم الأسس الجيولوجية التي تمكنه من متابعة دراسته.

وقد رأيت تطبيقاً للنظام الفصلي التي تسير عليه الجامعة حالياً، أن أعالج موضوعات الجيولوجيا الفيزيائية بجزئين: يغطي الأول منها مقرر الجيولوجيا (١) والثاني مقرر الجيولوجيا (٢) لطلاب السنة الأولى للعلوم الجيولوجية. يبحث الجزء الأول بإيجاز في منشأ الأرض وخواصها الفيزيائية وأغلفتها وكذلك في الصخور والفلزات المؤلفة لها. أما الجزء الثاني فهو موضوع هذا الكتاب، ويبحث في تأثير

العوامل الجيولوجية الخارجية والداخليـة، في صخـور القشـرة الأرضيـة والتضـاريس الناجمة منها.

وقد رأيت لتحقيق الغاية المطلوبة أن أعـالج موضوعـات هـذا الكتـاب في ثلاثـة أقسام، يبحث القسـم الأول في الجيودينـاميك الخـارجي، أي في الفعـل الجيولوجـي للعوامل الخارجية، مثل التجوية وحركـة الريـاح والأمطـار والمجـاري المائيـة وعمـل الجليديات ومياه البحار والبحيرات. بينما يعالج القسـم الثـاني القـوى الكامنـة الـتي تظهر أعمالها بنهوض السلاسل الجبليـة وثـوران الـبراكين. أمـا القسـم الثـالث فقـد خصص بملخص عن تطبيقات الجيولوجيا، حيث يكـون طـلاب السـنة الأولى علـى بينة بمجال تطبيق معلوماتهم الجيولوجية في الحقول العلميـة، واختيـار النواحـي الـتي يجدون في نفوسهم ميلا لها حتى ينصرفوا نحوها.

وقد بذلت جهـدا في اختيـار أوفـق التعبـيرات العربيـة الـتي تقـابل المصطلحـات الاجنبية، وتوخيت في الكتابة سهولة الاسـلوب وبسـاطة اللغـة وتسلسـل الأفكـار، وعززت الكتاب بعدد من الرسوم التوضيحية التي تسـاعد علـى تفهـم موضوعاتـه، وتتبع محتواها. كما أرفقت في نهاية الكتاب، قائمة ببعض المصطلحات الجيولوجيـة التي استعملتها، واستعنت في اعدادها بالمصطلحـات الجيولوجيـة الـواردة في المعجـم الموحد للمصطلحات العلمية بمراحـل التعليـم العـام الـذي أصدرتـه المنظمـة العربيـة للتربية والثقافة والعلوم التابعة لجامعة الدول العربية عام ١٩٧٧.

واني آمل أن يفيـد هـذا الكتـاب خاصـة طـلاب الجيولوجيـا، وطـلاب العلـوم الطبيعية والجغرافيا والعلوم الهندسية والعلوم الزراعية، وهو بالإضافة الى ذلـك يفيـد هواة الطبيعة حيث يجدون فيه شرحا لجميع الظاهرات الطبيعية التي تستهويهم.

ان هذا الكتاب يمثل مجهوداً تدريسياً للجيولوجيا الفيزيائية مدة تنوف على ست سنوات في قسم الجيولوجيا بجامعة دمشق، فهو محاولة علمية متواضعة، قـد لا تخلـو من بعض الثغرات، واني لاشكر كل من يتقدم برأي أو نصح، أو نقد بنـاء يسـاعد على تدارك التقصير في المستقبل، والله ولي التوفيق.

**دمشق ١٩٨٠**

# مُقَدِّمَة

## الطبعة الثانية

يسرني أن أقدم لطلاب السنة الأولى المتخصصين في العلوم الجيولوجية في الجامعات السورية وغيرها من الجامعات في أنحاء الوطن العربي الكبير، الطبعة الثانية من كتاب الجيولوجيا الفيزيائيه (٢).

لقد قطعت العلوم الجيولوجية شوطاً كبيراً في مضمار التطور والتوسع خلال العقود الثلاثة الماضية، وبخاصة فيما يتعلق بمفاهيم الجيولوجيا العامة المرتبطة بتكتونية الصفائح. التي اعتمدت على دراسة جيولوجيا البحار والمحيطات من خلال التطبيقات الجيوفيزيائية، ورصد أعماق المحيطات وتصويرها، وأخذ عينات من صخورها، ودراسات المغنطيسية القديمة، وتتبع النشاطات النارية والزلزالية التي قادت بمجملها إلى توضيح الحركات المستمرة لقطع الغلاف الصخري وأسبابها وما ينجم منها، من توسع قاع المحيطات وتشكل أجزاء جديدة من الغلاف الصخري مقابل زوال الأجزاء القديمة منه، وما يترافق معها من نشاطات نارية وبركانية ونمو القارات ونشوء الجبال وحدوث الزلازل وكل ما يتعلق بها من أحداث جيولوجية تجري على كوكبنا منذ وجوده حتى وقتنا الحاضر.

إن هذه المعرفة العلمية الجيولوجية الحديثة التي تراكمت معطياتها ونتائجها، خلال فترة زمنية قصيرة، فرضت نفسها لتدخل في الأطر الأساسية التعليمية في

الجيولوجيا. وهذا دافع علمي جيد شجعني للقيام بإجراء تعديلات جذرية على كتاب الطبعة الأولى.

تتناول موضوعات هذا الكتاب جوانب مهمة من العمليات الجيولوجية الطبيعية التي ترتبط بمختلف النشاطات الخارجية والداخلية للأرض، وآخر ما توصلت إليه المعرفة العلمية في وصف مظاهرها وتعليل أسبابها وطرائق الاستفادة منها وتجنب أخطارها.

وقد كانت هذه التعديلات والإضافات في الإخراج الجديد لهذا الكتاب ركناً أساسياً يساهم مساهمة فعالة في توضيح أفكار موضوعاته ليمكن الطالب من استيعابها بطريقة سهلة وواضحة. وقد زود بأفضل الأشكال الايضاحية التي أعطيت اهتماماً خاصاً من أجل دعم مختلف المعلومات الواردة فيه. كما روعي تسلسل الموضوعات وتتابعها وترابط الأفكار وتكاملها، بحيث يزود الطالب بقاعدة متينة من المعرفة الأساسية التي تساعده على متابعة دراسته في المقررات الجيولوجية المتنوعة والموسعة خلال السنوات التالية.

وكل ما اتمنى أن أكون قد وفقت في المساهمة في تأمين مرجع علمي يتطرق إلى جوانب مهمة من العلوم الجيولوجية، ويساهم مساهمة متواضعة في إغناء المكتبة العربية بالمراجع العلمية والله الموفق.

المؤلفة

# القسم الأول

## العوامل الجيولوجية الخارجية

## أو

## الجيوديناميك الخارجي

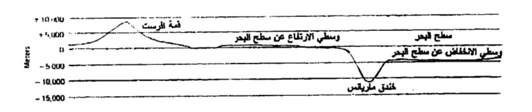
# تمهيد

## سطح الأرض المتغيّر

كيف يظهر لنا سطح الأرض إذا تصورنا أننا ننظر إليها من سفينة فضاء، وإن بحارها ومحيطاتها قد فرغت مياهها، ففي هذه الحالة علينا أن نتفحص سطحها الخارجي بدقة وعناية بغية تحري هيئاتها السطحية، التي تشمل اختلافاً كبيراً بين أعلى سلاسلها الجبلية وأعمق قيعان محيطاتها يبلغ نحو (٢٠) كيلو متراً. ويمكن تشبيه أعلى السلاسل الجبلية الموجودة على سطح الأرض بقصاصة من القماش ملتصقة على سطح كرة القدم. وتُظهر الصورة الفضائية للأرض من مسافات بعيدة جداً، أن الهيئات السطحية للمرتفعات والمنخفضات لا يمكن تمييزها. ولكن مع الاقتراب من الأرض تدريجياً يَبدأ تمييز هذه الهيئات، وأول ما يظهر فيها هو توزع القارات والمحيطات، ثم تظهر تدريجياً معالم أكثر تفصيلاً وهي خنادق المحيطات والسلاسل الجبلية العالية في القارات، ويزداد التمييز لتفاصيل أكثر بالاقتراب من الأرض.

يبلغ ارتفاع قمة افرست Everest في جبال هيمالايا (٨٨٤٨) متراً عن سطح البحر، كما يصل خندق ماريانس Marians في المحيط الباسيفيكي إلى (١١٠٣٤) متراً تحت سطح البحر، وإن المساحة التي تشغلها السلاسل الجبلية العالية والأغوار العميقة في خنادق المحيطات لا تشكل سوى مساحة بسيطة جداً من المساحة الاجمالية لسطح الأرض، فالأجزاء السطحية التي يزيد ارتفاعها على (٧٠٠) متراً من سطح البحر أو تنخفض عنه أكثر من (٧٠٠٠) متر تقل عن ١٪ من مساحة

سطح الأرض. ويظهر لنا أيضاً من خلال دراسة سطح الأرض حقيقة أن التضاريس تتوزع بشكل مميز في مستويين رئيسن: أحدها وسطي ارتفاعه عن سطح البحر يبلغ (٥٠٠) متر والآخر وسطي انخفاضه عن سطح البحر يبلغ (٤٥٠٠) متر. أي أن الفارق بين المستويين الوسطين للمرتفعات والمنخفضات هو بحدود (٥٠٠٠) متر. يضاف إلى ذلك أن أكثر من ثلثي مساحة الأرض يتوزع في مجال فارق وسطي يبلغ (١٠٠٠) متر في القارات والمحيطات (الشكل ١ ـ ١).




**شكل ١-١: تمثيل بياني يوضح قمة افرست وخندق ماريانس. ووسطي الارتفاع والانخفاض عن مستوى سطح البحر.**

ومن هذه الملاحظات لسطح الأرض يمكن التساؤل عن العمليات المسؤولة عن إعطاء سطح الأرض شكلها. هنالك عمليات تجري باستمرار وتتم غالباً بوساطة الطاقة الشمسية، التي تبخر المياه من سطح المحيطات والبحار والبحيرات والأنهار، وتأتي الرياح لتوزع بخار الماء خلال المستويات الدنيا من الغلاف الجوي atmosphere، فتتشكل الغيوم وتتساقط الأمطار والثلوج على سطح الأرض، وتتجمع على شكل أنهار وجليديات وغالباً ما تعود وتصب في المحيظات والمصادر المائية الأخرى. فهذه الدورة المائية تلعب دوراً كبيراً في العمليات الجيولوجية التي تعمل على التغيير المستمر في سطح الأرض، لأنها تتضمن قوى تحرك الرياح والمياه والجليديات التي تؤدي إلى تحطم الصخور وتهدمها. فإذا كانت هذه العمليات التهدمية هي التي تعمل لوحدها، فإن مرتفعات القارات سوف تتهدم تدريجياً وتذهب إلى البحار في غضون (٥٠) مليون سنة. وهذا لا يحدث في الطبيعة، إذ توجد إلى جانبها عمليات النشاط البركاني وبناء الجبال التي تعمل على زيادة رفع

الأراضي في إتجاه مضاد للثقالة. وتعتمد هذه العمليات على الحرارة الداخلية للأرض كمصدر من مصادر الطاقة، ومن هنا نستنتج أن عمليات التهديم والبناء تعمل باستمرار وتعطي اليابسة أشكالها بمرور الزمن.

## تهدم اليابسة أو اهتزاؤها Wearing away of the land

تتشكل معظم الصخور على أعماق مختلفة من سطح الأرض. فبعضها يتشكل من تحول الصخور الرسوبية الموجودة في أعماق القشرة الأرضية، وبعضها الآخر يتشكل من مغمات الأعماق أو من المعطف على أعماق نحو (٣٥٠) كيلو متراً.

حين تتكشف هذه الصخور على السطح، بنتيجة حركات تكتونية أو تعرية الصخور المغطية لها، تصبح معرضة لبيئة سطحية مغايرة تماماً لبيئة تشكلها، واستجابة لذلك تبدي الصخور درجات مختلفة من الصمود أمام الشروط البيئية الجديدة، إلا أنها لا بد أن تتغير تدريجياً حتى تصل مرة أخرى إلى حالة من التوازن مع هذه الشروط. وهذا التغيّر للصخور يعرف بالتجوية weathering. أما إزالة المواد الناتجة من التجوية فتعرف بالتعرية denudation. وتكون الطاقة الشمسية والثقالة الأرضية التي تحرك المواد لأسفل المنحدرات عوامل مهمة في هذه العمليات.

تؤدي التجوية إلى التفتت الميكانيكي والتفكك الكيميائي للصخور والفلزات الموجودة على سطح الأرض وتشكل منتجات جديدة منها. أما التعرية فتعمل على تجميع وازالة نواتج التجوية من مصدرها. ويقصد بالتعرية في كثير من الأحيان بأنها عمليات تؤدي إلى اهتراء اليابسة وتشمل التجوية وإزالة المواد المحواة، أما النقل transportation فهو عمليات نقل المواد الناتجة من اهتراء اليابسة من مكان لآخر.

وتتحقق التعرية، بما فيها النقل، بعوامل الرياح والسيول والأنهار والجليديات والأمواج والتيارات البحرية والمياه المتسربة في باطن الأرض. أما الترسيب deposition فهو تراكم المواد المنقولة في الأماكن التي تتوقف فيها عوامل النقل. وبالنهاية فإن جزءاً من الرسوبات يمكن أن يبقى في أماكن معينة لفترات كافية لكي تتلاحم ويرتص بعضها مع بعض لتشكيل الصخور الرسوبية sedimentary rocks، إن تشكل هذه الصخور يعاكس عمليات التهديم ويؤدي إلى البناء وبذلك تستمر الحلقة.

# الفصل الأول

## التجوية وتشكل الترب

**التجوية** هي مجموعة التغيرات الفيزيائية والكيميائية التي تطرأ على الفلزات والصخور الموجودة على سطح الأرض بتماسها مع الغلاف الجوي والمائي والحيوي. وتعمل التجوية الفيزيائية physical weathering على تحطيم وتفتيت الصخور بتأثير قوى طبيعية دون أن تغيّر في تركيبها الكيميائي. أما التجوية الكيميائية chemical weathering فتحدث بتفاعلات كيميائية بين الفلزات المؤلفة للصخور والمواد الموجودة في البيئة المحيطة، وبخاصة الماء والحموض والأوكسجين، مؤدية لتشكل فلزات جديدة تختلف عن الفلزات الأولية. وغالباً ما يكون هذان النمطان من التجوية متضافرين ويعملان معاً بالوقت نفسه، ولكنهما يختلفان بشدة التأثير، ويعتمدان بشكل رئيس على المناخ والتضاريس والزمن وتراكيب والصخور وبنياتها وغيرها من العوامل. وقد يضاف أحياناً إلى النوعين السابقين التجوية العضوية organic weathering. ولكن يبقى هذا النمط من التجوية تابعاً بمضمونه للتجوية الفيزيائية والكيميائية.

### ١- التجوية الفيزيائية:

تحدث التجوية الفيزيائية بنتيجة حركة المواد المؤلفة للصخر بتأثير عوامل مختلفة، تؤدي إلى تشويش روابطه الميكانيكية. ويلعب الدور الرئيس فيها العامل المسبب لحركة المادة الصخرية. ففي بعض الأحيان تحدث الحركة داخل الصخر نفسه دون أي سبب ميكانيكي خارجي. وهذا يشمل تغيرات في حجم مركبات الصخور

بتأثير تغيرات الحرارة (التجوية الحرارية thermal weathering). وفي حالات أخرى تحدث الحركه بفعل عوامل ميكانيكية خارجية مثل تجلد المياه ونمو البلورات وجذور الأشجار...الخ (التجوية الميكانيكية mechanical weathering).

## آ ـ التجوية الحرارية

لقد كان يعتقد أن تغيرات درجات الحرارة ما بين الليل والنهار في المناطق الصحراوية تؤدي إلى تسخين وتبريد غير متجانس للصخور، وبالتالي إلى تمدد وتقلص الحبات الفلزية على التوالي. وبالنظر لبطء اختراق الحرارة لأعماق الصخر، فالأجزاء السطحية تتمدد بنسبة أكبر من الأجزاء الداخلية، ويظهر بنتيجة ذلك شقوق تمتد موازية للسطوح الصخرية وتتقشر أجزاؤها السطحية. إلا أن التجارب المخبرية لم تؤيد هذا الاعتقاد، ففي إحدى التجارب سخنت الصخور إلى درجة حرارة أعلى بكثير من الحرارة العادية التي تتعرض لها الصخور السطحية، ثم بُردت، وتمت إعادة هذه العملية مرات عديدة لتمثل مئات سنين من التجوية، ولكن لم تظهر هذه الصخور سوى تغيّرات طفيفة. ويعتقد أن حادثة التقشر الشائعة في المناطق الصحراوية تحدث بسبب عوامل أخرى سوف تناقش فيما بعد، ولكن يمكن القول أن التبريد المفاجئ للصخور بوساطة الأمطار يؤدي إلى قوى ضغط غير متجانس على الحبات الصخرية ويمكن أن يساعد على هذه العملية.

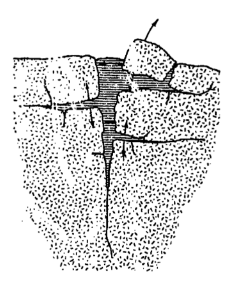
ومن المحتمل أن تكون النار عاملاً مهماً في التكسر الميكانيكي للصخور، التي يمكن ملاحظتها بوضوح في حالة حرائق الغابات، حيث يؤدي التسخين الشديد للصخور إلى تمدد الطبقات السطحية، وتفلقها، وتطاير شظايا منها بحجوم مختلفة.

## ب ـ التجوية الميكانيكية

### ب ـ١ـ التجلد الاسفيني Frost wedging

إن تأثير تجلد المياه في الصخور أسرع بكثير من تأثير بقية العوامل. حيث تتسرب المياه خلال شقوق وفراغات الصخور، وتتجمد عند انخفاض درجة الحرارة مع ازدياد في الحجم بمقدار ٩٪، لأن جزئيات الماء تُرتب نفسها في هيكل بللوري مفتوح عند التبلور، وتؤدي هذه الزيادة الحجمية إلى قوة ضغط كبيرة تقدر

ب[illegible] كغم/سم²). وهذه القوة أكبر بـ (٤٠) مرة من القوة اللازمة لتحطيم صخر الغرانيت. وتتغلب هذه الضغوط على قوى روابط الصخر وتفتته إلى قطع بحجوم مختلفة، قد يزن بعضها أحياناً بضعة أطنان (شكل ١-٢).



**شكل ١-٢: رسم تخطيطي يوضح آلية التجلد الاسفيني.**

يكون هذا النوع من التجوية واضحاً في المرتفعات الجبلية للمناطق المعتدلة، حيث توجد دورات يومية ما بين ارتفاع درجة الحرارة في النهار وانخفاضها دون الصفر في الليل، فالقوى الناجمة من تجلد المياه وذوبانها تؤدي إلى تكسر وتفتت الصخور، وتتدحرج المواد الناتجة إلى أسفل المنحدرات مشكلة منحدرات ركام الإنهيار talus slopes (شكل ١-٣).

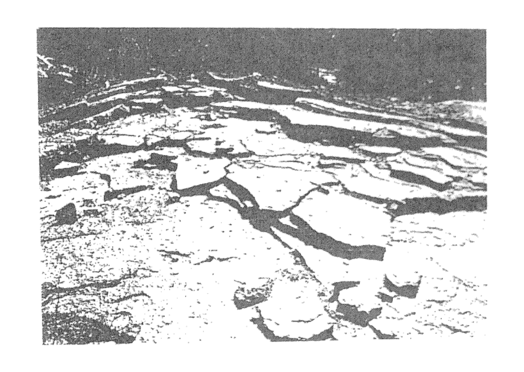
تكون آثار التجلد الاسفيني واضحة جداً في المناطق القريبة من القطب (وليس في القطب لأن الجليد نادراً ما يذوب فيها)، حيث نجد فيها مساحات واسعة مغطاة بقطع ذات حجوم مختلفة تعرف ببحار الحجارة stones seas. وقد يؤدي أحياناً التجلد الاسفيني إلى تخلخل الحبات الفلزية المكونة للصخور وتحررها مع مرور الزمن.



**شكل (١-٣): منحدر ركام الانهيار (التالوس).**

## ب -٢- تخفيف الحمل unloading

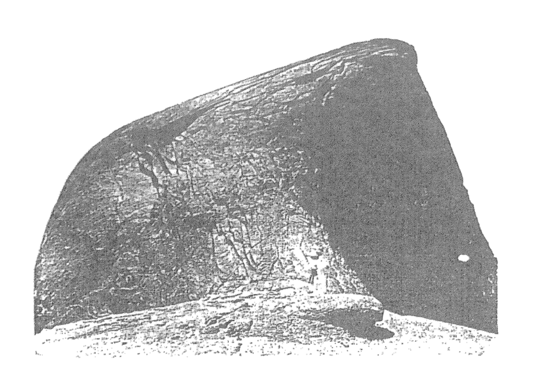
تحدث هذه العملية من التجوية في الأجسام النارية الضخمة بخاصة تلك المكونة من الغرانيت. عندما تتحرر هذه الصخور من الضغوط الواقعة عليها، فأجزاؤها الخارجية تتمدد أكثر من العميقة، وتنفصل عن بقية الجسم الصخري على شكل غطاءات sheets تشبه إلى حد ما ورق اللعب المكدس بعضه فوق بعض (شكل١-٤).



**شكل (١-٤): يوضح التصفح في الصخور الغرانيتية.**

تخضع الصخور الواقعة تحت سطح الأرض إلى ضغوط عالية بسبب وزن الصخور المغطية لها. وحين تزاح هذه الصخور بالتعرية فإن الضغط ينخفض، فتتجاوب الصخور العميقة بتمددها نحو الأعلى وتتطور فيها شقوق وفواصل متقاربه تكون عادة على شكل مجموعات. وتنشأ من الفواصل التي تتطور بموازاة سطح الأرض غطاءات صخرية واسعة لا تزيد سماكتها على (١٠) سنتمترات بالقرب من السطح، وتزداد سماكتها مع العمق، ثم تختفي على أعماق نحو (٥٠) متراً، كما ان استمرار عملية التجوية يؤدي إلى انفصال الصفائح وازالتها، وتعرف

هذه العملية بالتصفح sheeting. وأحياناً يأخذ الجسم الناري المتقشر شكل القبة كما هو الحال في قبة هاف دوم Half Dome الموجودة في منتزه اليوسيميت Yosemite Park في الولايات المتحدة (شكل ١ـ٥)



**شكل (١ـ٥): قبة هاف دوم وهي قبة تقشر في منتزه اليوسيميت.**

ومع أن معظم الشقوق fractures والفواصل joints السابقة تشكلت بنتيجة عملية التمدد. إلا أن بعضها ينشأ من التقلص عند تصلب المغما، وبعضها الآخر ينشأ عن القوى التكتونية المرافقة لبناء الجبال. فالشقوق والفواصل هي من البنيات المهمة التي توجد في الصخور، وتسمح بمرور الماء إلى أعماقها حيث تبدأ فيها عملية التجوية قبل وصولها إلى سطح الأرض بوقت طويل.

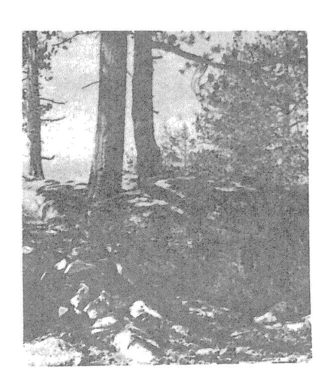
### ب ـ٣ـ تبلور الأملاح Crystallization of salts

يؤدي تبلور الأملاح في شقوق ومسامات وفجوات الصخور إلى قوى كافية لتفتيت هذه الصخور. وتلاحظ هذه الظاهرة بشكل جيد تحت شروط المناخ

الجاف في المناطق الصحراوية، حيث يؤدي ارتفاع درجة الحرارة في النهار إلى صعود المياه الجوفية بالخاصة الشعرية إلى السطح فتتبخر وتتبلور الأملاح المنحلة ضمن الشقوق والمسامات مولدة ضغوطاً كبيرة تحطم الصخور.

### ب ـ٤ـ نشاط العضويات Organisms activities

تتم التجوية أيضاً بوساطة نشاط النباتات والحيوانات ونشاط الانسان. فنمو جذور النباتات في الشقوق والمسامات الصخرية يطبق ضغطاً كبيراً على جدرانها ويؤدي إلى تفلق الصخور (شكل ١ـ٦). وبالوقت نفسه تفرز نهايات جذورها حموضاً تؤدي إلى حل الصخور، وهذا متواقت مع هضم عناصر مختلفة لتغذيتها. أما جذور النباتات الميتة فتنتبج بمياه الأمطار وتؤدي إلى تفكك الصخور ميكانيكياً، وتنتج من تحللها أحماض تزيد في التجوية الكيميائية.



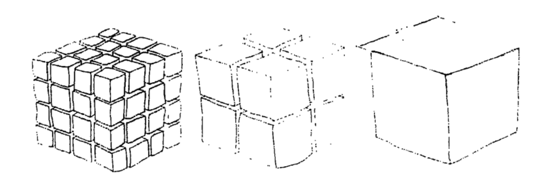
الشكل (١ـ٦): تساهم جذور النباتات في التجوية الميكانيكية بتوسيع الشقوق في الصخور.

وكذلك فإن الديدان الأرضية والنمل والقوارض rodents تلعب دوراً في الحفر تحت الأرض،ونقل جزئيات الصخور إلى السطح وجعلها عرضة إلى التجوية الفيزيائية والكيميائية. وقد أجرى العالم شارلز داروين Charles Darwin حسابات دقيقة على كميات المواد المفتتة المنقولة إلى السطح بوساطة الديدان الأرضية، فكانت بمعدل (٢,٥) كغ/م٢ في السنة. وكتب أيضاً الجيولوجي برانر Branner في دراسته لحوض الأمازون أن التربة تبدو وكأنها قلبت بوساطة النمل، وهذا يوضح أن الأعداد الهائلة والعمل المستمر لهذه الكائنات الضعيفة، خلال فترات طويلة من الزمن، يؤدي إلى تأثيرات كبيرة في تجوية الصخور. وكذلك فإن نشاط الانسان يلاحظ بوضوح حين تقتلع الصخور للبحث عن الثروات المعدنية، أو تنفيذ المشاريع العمرانية. ولكن هذا النشاط يأتي في مرتبة ثانية في التجوية الميكانيكية بعد نشاط الحيوانات الحافرة.

## ٢ـ التجوية الكيميائية

تشمل التجوية الكيميائية عمليات معقدة ينتج منها تغيّر في البنية الداخلية للفلزات بإضافة بعض العناصر أو حذفها. ويؤدي هذا التغيّر إلى تفكك الصخر الأصلي،وتشكل مواد جديدة تكون متوازنة مع شروط البيئة السطحية. وتبقى منتجات التجوية هذه ثابتة ما دامت في بيئتها الجديدة.

تحطم التجوية الفيزيائية الصخور وتفتتها مما يزيد المساحة السطحية المعرضة لمؤثرات التجوية الكيميائية (شكل ١ـ٧)، بينما تكون التجوية الكيميائية بطيئة جداً في حال عدم تعرض الصخور لعمليات التجوية الفيزيائية. وفي الوقت نفسه الذي يضعف فيه الفساد الكيميائي للصخور يحدث المزيد من التجوية الفيزيائية، وكلتا العمليتين، يتضافر بعضهما مع بعض.



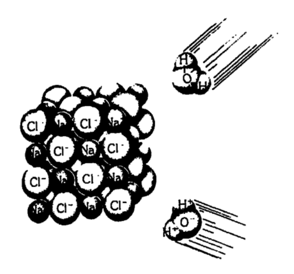

**شكل ١-٧: تزداد المساحة السطحية بنسبة كبيرة عندما يتحطم المكعب إلى كتل أصغر.**

تتضمن عمليات التجوية الكيميائية الانحلال بالماء والحموض كما تتضمن الأكسدة والإماهة والحلمهة، وهذه العمليات تحرر إيونات تجعلها تدخل في محاليل. أو تشكل مواد فلزية جديدة تكون ثابتة كيميائياً في بيئتها الجديدة.

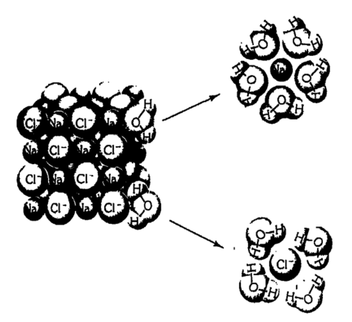
## ١- الإنحلال بالماء Solution by water

إن الماء عامل كيميائي فعال لأنه مؤلف من أيونات الهيدروجين $H^+$ والهيدروكسيل $OH^-$، وإن أيون الهيدروجين هو العامل الفعال في عمليات التجوية الكيميائية. فالهاليت أوالملح الصخري، (وهو فلز كلور الصوديوم) أكثر الفلزات انحلالاً بالماء، مع أنه يحافظ على تعادل شحناته الكهربائية وتبقى أيوناته محتفظة بشحناتها. بالاضافة إلى هذا فإن جزيئات الماء ثنائية القطب (الشكل ١-٨)، فالطرف الذي فيه ذرة الاوكسجين له شحنة سالبة، والطرف الذي فيه ذرتا هيدروجين له شحنة موجبة، فعندما تصطدم جزئيات الماء ببلورة الهاليت فإن نهاياتها السلبية تتصل بأيونات الصوديوم الموجبة وتجذبها من البناء البلوري.

وكذلك الحال بالنسبة لأيونات الكلور التي تنجذب إلى النهايات الموجبة لجزيء الماء وبهذا يتشكل محلول كلور الصوديوم.




أ – مهاجمة أيونات الصوديوم والكلور بواسطة جزئيات الماء ثنائية القطب




ب – إحاطة أيونات الصوديوم والكلور، بعد انتزاعها ، بعدد من جزئيات الماء

شكل (١-٨): يوضح انحلال كلور الصوديوم في الماء

ويكون انحلال كلور الصوديوم بالماء الساخن أسرع منه في الماء البارد، لأن درجة الحرارة ترفع تركيز أيونات الهيدروجين، فإذا ارتفعت درجة الحرارة من الصفر إلى ٣٠° درجة مئوية ارتفع التركيز إلى الضعف. وبالرغم من أن معظم الفلزات تنحل بالماء، إلا أن وجود كمية ضئيلة من غاز CO2 يجعله حمضياً ويزيد بشكل ملحوظ في انحلالها.

### ٢- الانحلال بالحموض Solution by acids

إن كثيراً من المياه الطبيعية ما هو في الحقيقة إلا حموض ضعيفة تشكلت في الطبيعة. وإن وجود كمية ضئيلة من الحموض في الماء يزيد في قدرته على التأين. فأي حمض، بغض النظر عن نوعه، يحتوي على أيون الهدروجين ($H^+$)، الذي يتفاعل مع كثير من الفلزات ويساعد على تخريبها، فمثلاً الصخور الكلسية والدولوميتية من السهل جداً إذابتها بأضعف المحاليل الحمضية.

يتشكل حمض الكربون من انحلال غاز ثنائي أوكسيد الكربون (CO2) الموجود في الهواء في مياه الأمطار والمياه السطحية:

$$CO2 + H2O \longrightarrow H2\ CO3$$

ويتأين حمض الكربون إلى أيون الهدروجين وأيون البيكربونات على الشكل التالي:

$$H2\ CO3 \longrightarrow H^+ + HCO_3^-$$

وإن أيون الهدروجين هو الفعال، حيث يتفاعل بسهولة مع جذر الكربونات الموجودة في الحجر الكلسي:

$$CaCO3 + 2H^{+1} \longrightarrow CO2 + H2O + Ca^{2+}$$

ففي هذا التفاعل يترابط أيونان من الهدروجين مع اوكسجين واحد ليشكل الماء، وتتحرر أيونات الكالسيوم، وينطلق ثنائي أوكسيد الكربون، ويبقى الكالسيوم منحلاً بالماء. ويمكن لغاز (CO2) أن يتفاعل ثانية مع الماء ليشكل أيضاً حمض الكربون.

وكذلك يتم تفاعل مماثل في الصخور الدولوميتية:

$$CaMg(CO_3)_2 + 4H^+ \longrightarrow 2H_2O + Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2CO_2$$

وينحل كل من الكالسيوم والمغنيزيوم في الماء، وتتحول في هذه العملية كربونات الكالسيوم والمغنيزيوم غير المنحلة إلى نواتج ذائبة. إن وجود أيونات الكالسيوم والمغنيزيوم في الماء يجعلانه ماءً عسراً. لذلك فإن المناطق التي تنتشر فيها الصخور الكلسية والدولوميتية تكون مياهها الجوفية عسرة، وتتشكل فيها المغاور والكهوف لإنحلال هذه الصخور بالماء الحمضي.

كذلك يتشكل حمض الكبريت في الطبيعة من أكسدة فلزات السلفيدات كالبيريت Pyrite. وهو فلز شائع الإنتشار في كثير من الصخور كما يوجد أيضاً في الفحم الحجري. يتأكسد البيريت الموجود فيها بملامسة أوكسجين الهواء ليعطي حمض الكبريت، الذي يغسل منها ويذهب إلى الأنهار أو الى المياه الجوفية:

$$2FeS_2 + 2O_2 + 2H_2O \longrightarrow 2FeSO_4 \longrightarrow 2H_2SO_4$$

حمض الكبريت    كبريتات الحديدي    البيريت

يؤدي العمل المنجمي المكشوف إلى تعرض الفحم الحجري للهواء، وحدوث مشكلات تلوث بنزوح محلول حمضي من المنجم. وإن حمض الكبريت حمض قوي يتفاعل بسهولة مع معظم الصخور.

## ٣- الاكسدة oxidation

هي ضياع الكترونات بوساطة عناصر خلال التفاعل الكيميائي. وليس من الضروري أن تحدث هذه العملية خلال الاتحاد مع الأوكسجين. ولكن من الشائع في الطبيعة وجود الأوكسجين الحر في الغلاف الجوي وفي الفتحات الصخرية وفي مسام التربة، فمن السهل اتحاده مع العناصر الموجودة فيها. وبالرغم من أن عملية الأكسدة تتم ببطء كبير في البيئات الجافة، إلا أن وجود الماء يسرع التفاعل وتظهر هذه الحقيقة حين نقارن الحديد الذي يصدأ ببطء في المناخ الجاف وبسرعة في المناطق المعرضة للأمطار.

تعد عملية الأكسدة مهمة في تحلل الفلزات الحاوية على الحديد كالبيريت والأوليفين والبيروكسين و الأمفيبول والغرينا، وفي عدد من الفلزات الشائعة الأخرى التي يكون فيها الحديد غالباً بحالة ثنائي التكافؤ $Fe^{++}$، وهذا يعني أنه فاقد لإلكترونين بالمشاركة أو الانتقال، وحين يتفاعل مع الأوكسجين يفقد الكترونًا آخر ويصبح حديداً ثلاثياً لينتج اوكسيد الحديد ذا اللون البني المحمر والمسمى هيماتيت Hematite وفقاً للمعادلتين التاليتين:

$$4Fe + 3O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 \qquad (1)$$

$$2Fe_2SiO_4 + O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 2SiO_2 \qquad (2)$$

وحين تدخّل الماء كوسيط كيميائي، كما هو الحال في الطبيعة، يكون التفاعل حسب المعادلة التالية:

$$2Fe_2SiO_4 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4FeO(OH) + 2SiO_2 \qquad (3)$$

وتوضح هذه المعادلة أيضاً عملية الخنمهة.

## ٤ ـ الحلمهة hydrolysis

وهي تفاعل أي مادة مع الماء، حيث أن جزيئات الماء تنفصل إلى أيونات الهيدروجين ($H^+$) وأيونات الهيدروكسيل ($OH^-$)، وتكون هذه الأيونات جاهزة للدخول في كثير من التفاعلات الهامة التي تتضمن بخاصة التفاعلات مع معظم الفلزات السيليكاتية ما عدا مجموعة الكوارتز. ففي حال حلمهة فلزات الصفاح تتشكل فلزات الغضار وتنقل السيليكا والأيونات المعدنية على شكل محاليل. ويمكن أن نوضح ذلك بتفاعل فلزات صفاح الأورتوكلاز مع الماء:

$$2KAlSi_3O_8 + (3H^+ + OH^-) \rightarrow 2K^+ + Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 4SiO_2 \qquad (5)$$

الأورثوكلاز

في هذا التفاعل يهاجم أيون الهيدروجين أيون البوتاسيوم ليحل محله في الشبكة البلورية لنصفاح. ويتحرر أيون البوتاسيوم مكوناً بيكربونات البوتاسيوم المنحلة، أو يبقى في التربة لتغذية النباتات. وتتشكل فلزات الغضار من إضافة أيونات الهيدروكسيل إلى البناء البلوري، كما ينفصل جزء من سيليكا الصفاح وينقل على شكل محاليل. وعادة تحوي المياه في الطبيعية على ثنائي اوكسيد الكربون، مما يساهم بأيونات إضافية من الهيدروجين تعمل على الاسراع في عملية الحلمهة:

2kAl Si3O8 + 3H2O + 2CO2 ⟶Al2Si2O5(OH)4 + 4SiO2 +2CO3 HK

الأورثوكلاز          الكاولينيت

### ٥- الإماهة hydration

وهي نمط آخر من التجوية الكيميائية. ففي هذه العملية تدخل جزيئات الماء مباشرة في بنية الفلز لتشكل فلزاً جديداً. فالجص Gypsum مثلاً يتشكل من إماهة الانهيدريت Anhydrite حسب المعادلة:

CaSO4 + 2H2O ⟶ CaSO4.2H2O

الانهيدريت          الجص

إن النقطة (.) في صيغة فلز الجص هي رمز للدلالة على وجود جزئيات الماء في البنية البلورية crystal structure للجص.

## بعض نواتج التجوية Some results of weathering

ماذا يحدث عندما تتعرض الصخور الشائعة للتجوية الكيميائية؟ ولماذا يتجوى بعضها بسهولة أكثر من البعض الآخر؟ ومن أجل الإجابة على ذلك نفترض أننا نقارن البازلت مع الحجر الرملي، ولنلاحظ أياً من الصخرين يتجوى بشكل أسرع مع اعتماد بيئات التشكل لهذين الصخرين. فالبازلت صخر ناري مؤلف من فلزات تبلورت في درجات حرارة تكون غالباً أعلى من ١٠٠٠° درجة مئوية، من صهارة مغماتية أتت من الأعماق، أي من بيئة تختلف تمام الاختلاف عن البيئة السطحية. وبالمقابل نجد أن الحجر الرملي مكون من حبات الكوارتز التي حررتها التجوية من صخور أقدم وتشكل بعمليات الترسيب.

إن البازلت والحجر الرملي مؤلفـان مـن فـلزات قاسية تقـاوم الـبري والاهـتراء بشكل جيد، وكلاهما يُتوقع استجابته للتجوية الفيزيائية، ولكن الصخرين يختلفـان كيميائياً. فالكوارتز في الحجر الرملي يقاوم المؤثرات الكيميائية، وكذلك المـلاط إذا كان من السيليكا أو الغضار أو اوكسيد الحديد، أما إذا كان مؤلفاً مـن الكالسيت فإن يتأثر بسرعة بالمياه. وبالمقابل، إن الفلزات المكونـة للبـازلت هـي البلاجيوكـلاز الكلسـي والبيروكسين والأوليفين وهـي مهيـأة بطبيعتهـا للتحـاوب مـع التجويـة الكيميائية وبخاصة الحلمهة والأكسدة.

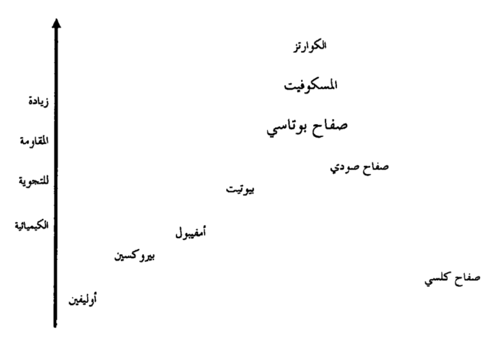
وفي هذا المجال سوف ندرس تجوية ثلاثة أنواع من الصخور الشائعة لنرى كيف تتجوى في مناخ معتدل ورطـب، ومـا هـي النواتـج المتشـكلة، ومـاذا يحـدث لهـذه النواتج.

آ ـ تجوية الغرانيت

يتألف صخر الغرانيت من الصفاح البوتاسي والكوارتز وقليـل مـن الهورنبلانـد والبيوتيت. وعندما يتكشـف هـذا الصخـر علـى سـطح الأرض يتحطـم بالتجويـة الفيزيائية مما يـؤدي إلى تسـارع تجويتـه الكيميائيـة. وتـأخذ عمليـة الحلمهـة مجراهـا ويفسد أولاً الهورنبلانـد والبيوتيـت ثـم الاورثوكـلاز (المعادلـة ٥)، وتتحطـم هـذه الفـلزات لتشـكل فـلزات غضاريـة مـع بعـض السـيليكا المنحلـة. وتتحـرر ايونـات الصوديوم والمغنـيزيوم والكلسـيوم مـن الهورنبلانـد والبيوتيـت، كمـا يتحـرر أيـون البوتاسيوم من البيوتيت والأورثوكلاز وجميعها تنقل على شكل محاليل. أما الحديـد في الهورنبلاند والبيوتيـت فيتأكسـد إلى هيمـاتيت أو ليمونيـت (المعـادلتين ٢ و٣). وهكذا يتحول الغرانيت المتماسك إلى غرانيت مفتت مع بقـع صدئيـة مـن أكاسـيد الحديد، وتغطي حباتـه الفلزيـة طبقـات رقيقـة مـن الغضـار. ومـع اسـتمرار عمليـة التجوية تغسل السيليكا والأيونات القلوية بالمياه الجارية، ويتضاءل الصخـر تدريجيـاً ليصبح حطامـاً مؤلفـاً مـن حبـات كوارتزيـة غـير متماسـكة مـع بقايـا مـن شـظايا الأورثوكلاز إضافة إلى الغضاريات، وغالباً ما يتلون هذا الحطـام بأكاسـيد الحديـد. وفي النهاية تقوم الرياح والمياه الجارية بانتزاع الغضار والأكاسيد وفصلها عن حبات الكوارتز. وبذلـك تكـون التجويـة وعوامـل النقـل قـد فصلـت المكونـات الأصليـة

للغرانيت بعضها عن بعض. ويمكن أن تصل محاليل الصوديوم والأيونات الأخرى إلى البحر لتضاف إلى مخزونه الملحي الضخم، وأن تساق الغضاريات بالمجاري المائية والأنهار إلى البحار لتتراكم تدريجياً على شكل أوحال بحرية. أما حبات الكوارتز فتجرفها المياه الجارية على شكل رمال وتترسب على امتداد مجاريها على شكل حواجز رملية يمكن أن تتخرب حين اشتداد التيارات المائيه وتتابع عمليات النقل إلى أحواض الترسيب.

لقد وجد العلماء بنتيجة الدراسات أن قابلية الفلزات السيليكاتية للتأثر بالتجوية الكيميائية يكون بترتيب عكسي لتبلورها من المغما (شكل ١ـ٩)، فالفلزات السيليكاتية التي تتبلور في درجات عاليه من الحرارة كالأوليفين والأوجيت والهورنبلاند تتجوى بسرعة أكبر من الفلزات التي تتبلور في درجات أخفض من الحرارة كالبيوتيت والصفاح البوتاسي. وإن الكوارتز الذي يتشكل بدرجات منخفضة من الحرارة هو أكثر الفلزات ثباتاً تجاه التجوية الكيميائية.




**شكل (١-٩): يبين تسلسل الفلزات السيليكاتيه حسب سرعة تأثرها بالتجوية الكيميائية.**

يمكن أن نلخص نواتج التجوية الكيميائية للفلزات السيليكاتية الشائعة في الجدول التالي:

| | الفلزات | التركيب الكيميائي | أهم منتجات التجوية الكيميائية | |
|---|---|---|---|---|
| | | | فلزات | مواد منحلة |
| | كوارتز | $SiO_2$ | حبات الكوارتز | |
| | أورثوكلاز | $KAlSi_3O_8$ | - غضاريات<br>- كوارتز (بلورات ناعمة) | - بعض السيليكا في محاليل<br>- كربونات البوتاسيوم |
| الصفاح | البيت (بلاجيوكلاز صودي)<br>أنورثيت (بلاجيوكلاز كلسي) | $NaAlSi_3O_8$<br>$CaAl_2Si_2O_8$ | - غضاريات<br>- سيت<br>- كوارتز (بلورات ناعمة) | - بعض السيليكا<br>- كربونات الكالسيوم والصوديوم |
| فلزات حديدية مغنيزية | بيوتيت<br>هورنبلاند<br>أوجيت | سيليكات الألمنيوم حديديه مغنيزيه كلسيه | - غضاريات<br>- كالسيت<br>- ليمونيت<br>- هيماتيت<br>- كوارتز (بلورات ناعمة) | - بعض السيليكا<br>- كربونات الكالسيوم والصوديوم والمغنيزيوم |
| | أوليفين | $FeMgSiO_4$ | - ليمونيت<br>- هيماتيت<br>- كوارتز (بلو ات ناعمة) | - بعض السيليكا<br>- كربونات المغنيزيوم والحديد |

**جدول ١-: يبين نواتج التجوية الكيميائية للفلزات السيليكاتية الرئيسة المكونة للصخور النارية.**

### ب ـ تجويه الغضار الصفحي

إن الغضار الصفحي shale صخر رسوبي مؤلف بمعظمه من فلزات غضارية مع قليل من حبات الكوارتز السلتية والملاط الكلسي مع بقايا ناجمة من تفحم المادة العضوية. ويكون الغضار الصفحي ضعيفاً بشكل عام تجاه العمليات الفيزيائية، كالتجلد والتندي والجفاف، التي تساعد على تفتيته وفصل الحبات الغضارية بعضها عن بعض، لأنه طري وناعم الحبيبات وذو مسامية عالية، ولكن تقاوم فلزاته التجوية الكيميائية لأنها تنتج منها.

### حـ ـ تجوية الحجر الكلسي

يتألف الحجر الكلسي من فلز الكالسيت الذي ينحل بسهولة بالمياه المحملة بغاز ثنائي أوكسيد الكربون. وبقدر ما يتشظى الصخر بالتجوية الفيزيائية تصبح عمليات الانحلال بالحموض أكثر أهمية.

تتغلغل مياه الأمطار والمياه الجوفية الحمضية في الشقوق والفواصل بين الطبقات، وتؤدي إلى تآكله تدريجياً وانتزاع أيونات الكالسيوم والمغنيزيوم منه على شكل محاليل. فإذا كان الصخر الكلسي يحتوي على شوائب حديدية فإنها تلون الشقوق باللون الصدئي. أما إذا كانت الشوائب مؤلفة من حبات الكوارتز والغضار فإنها تتراكم على شكل متبقيات، ولا تلبث أن تغسل وتزول بالمياه. أما إذا كان الصخر الكلسي نقياً أو دولوميتياً فإنه يزول كلياً بالانحلال دون أن يخلف وراءه بقايا من الرمال أو الغضار.

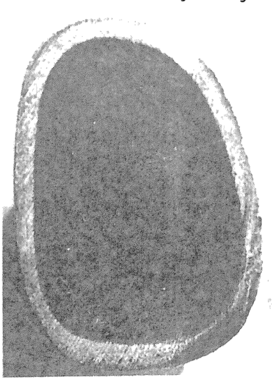
## تركيز الفلزات الثابتة Concentration of stable minerals

ليس فلز الكوارتز الفلز الوحيد الذي يقاوم عمليات التجوية الكيميائية، وانما توجد فلزات أخرى تبقى ثابتة نسبياً على سطح الأرض، مثل فلزات الماس Diamond والبلاتين Platinum والذهب Gold حيث توجد في الريغوليت regolith المجوى.

تحرر التجوية هذه الفلزات من الصخور والعروق المحتوية عليها، وتنقل بوساطة المياه، ولا يلبث بعضها أن يترسب في قاع المجاري المائية، لكثافته العالية، على شكل توضعات مكيثة placer deposits. ويمكن أن تكون هذه التوضعات بتراكيز كافية تجعلها ذات قيمة اقتصادية عالية.

## لحاء التجوية Weathering rind

إذا كسرنا حصاة بازلتيه كبيرة cobble فسوف نلاحظ وجود قشرة أو لحاء خارجية فاسدة تحيط بلب داخلي غير متأثر (شكل ١-١٠). وان الفحص المجهري لهذه القشرة يبين أنها مؤلفة من بقايا التجوية الكيميائية. وتتشكل هذه القشرة في جميع أنواع الصخور حتى في الصخور الأكثر ثباتاً من الناحية الكيميائية كالكوارتزيت والأوبسيديان Obsidian. وتزداد سماكة هذه القشرة تدريجياً مع تقدم التجوية الكيميائية في الصخر. ونتيجة لذلك فقد وجد الجيولوجيون أن هذه القشرة تفيد في تقدير العمر النسبي للرسوبات التي تحتوي على نماذج منها. وقد أُعتمد عليها في تأريخ الأدوات الحجرية القديمة.

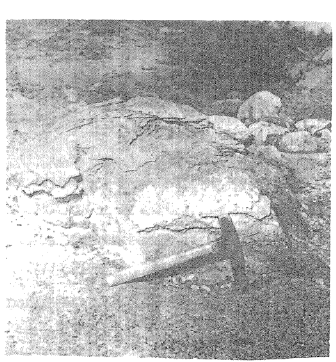


شكل (١-١٠): يوضح لحاء التجوية في حصاة بازلتية بسماكة حوالي ٢مم.

## التقشر والتجوية الكُروانية Exfoliation and spheroidal weathering

عملية التقشر هي انفصال قشور صخرية رقيقة متتابعة عن نواة صخرية غير مجواة، تسببها القوى الفيزيائية أو الكيميائية التي تعطي جهوداً تفاضلية differential stresses ضمن الصخر.

إن تحول الفلزات السيليكاتية في الصخور النارية إلى فلزات غضارية بالتجوية الكيميائية يرافقه زيادة في الحجم، نتيجة إضافة الماء في البناء البلوري، فهذه الزيادة في كتلة القسم السطحي تضغط بقوة نحو الخارج مما يؤدي إلى انفصال قشرة عن الجسم الأصلي للصخر. وان انفصال القشرة الخارجية يعطي فرصة للتجوية الكيميائية للتغلغل لعمق أكبر، وهكذا تستمر عملية التقشر (شكل ١-١١). وتتم هذه العملية سواء على سطح الأرض أو تحت السطح، ويمكن ملاحظتها غالباً عند شق الطرقات. وهي كذلك ليست مقتصرة على مناخ معين، مع أن تأثيرها يظهر بوضوح في المناخ الجاف، حيث تغطي الجلاميد boulders شبه الكروية والمتقشرة سطح الأرض.



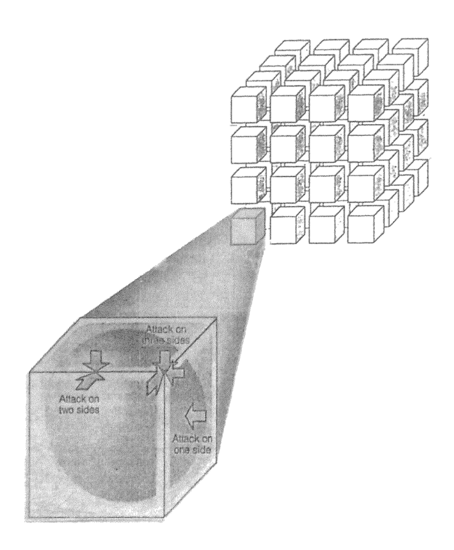
**شكل (١-١١): يوضح عملية التقشر في جلمود غرانيتي**

تكـون غالبـاً الأشـكال شبه الكرويـة والمتقشـرة الـتي تشـكلت بفعـل التجويـة الكيميائية متوضعة في صفوف تتجـه باتجاهـات مختلفـة، ذلـك لأن تشـكلها مرتبـط بوجود الشقوق والفواصل في الصخور النارية، التي تُقسم الصخـر إلى كتـل صغـيرة متجاورة، مما يساعد على تسرب المياه المحملة بثنائي اوكسيد الكربون خلالها. ويتم تأثيرها في كل كتلة من كتل الصخر المتشقق علـى حـدة، ممـا يـؤدي في النهايـة إلى تفككها إلى أشكال شبه كروية (شكل ١-١٢).



**شكل (١-١٢): التجوية الكروانية لصخور غرانيتية كثيفة الفواصل.**

يعزى اتخاذ كتل الصخر المتشققة ذلك المظهر شبه الكـروي إلى أن زوايـا كتلـة الصخـر غالبـاً مـا تكـون أكـثر تعرضـاً للتجويـة الكيميائيـة، لأن نسـبة مسـاحتها السطحية إلى حجمها كبيرة إذا ما قيست بالحواف والأسطح (شكل ١ـ١٣) ولـذا تتعرض هذه الزوايا للتحلل السـريع، وتتحـول كتلـة الصخـر إلى كتـل ذات شـكل كُرَواني spheroid وعليه فإنها تسمى التجوية الكُرَوانية.




**شكل (١-١٣): يوضح أن الزوايا أكثر عرضة للتأثر الكيميائي من الحواف والأوجه.**

## العوامل المؤثرة في التجوية Factros influence weathering

يتأثر نوع تجوية الصخور ومعدلها بعدة عوامل أهمها: التركيب الصخري والمناخ والوضعية الطبوغرافية والزمن.

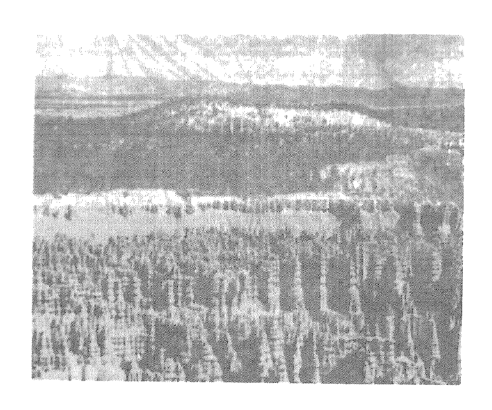
**١- التركيب الصخري والبنية الصخرية:** رأينا سابقاً أن الفلزات تتأثر بشكل متباين بالتجوية، فمن الطبيعي أن تتأثر الصخور تأثراً متبايناً. فالكوارتز يكون

شديد المقاومة للفساد الكيميائي وبالتالي تكون الصخور الحاوية نسبة عالية من هذا الفلز مقاومة أيضاً. لذلك تظهر الهضاب والجبال المؤلفة من صخور غرانيتية أو كوارتزيتية بارزة بشكل واضح عن الأراضي التي تحيط بها والمؤلفة من صخور ذات مقاومة أقل وتحوي نسبة قليلة من الكوارتز.

يؤثر أيضاً النسيج الصخري والبنية في معدل تجوية الصخور إضافة إلى تركيبها الفلزي، فالصخورالغرانيتية والكوارتزيتية، تتحطم بشكل سريع بالتجلد إذا كانت تحتوي على الكثير من الشقوق والفواصل. وبصورة عامة تتجوى الصخور الرسوبية والاستحالية بسرعة أكبر من الصخور النارية لوجود سطوح التطبق والصفوفية.

إن التنوع التضاريسي الذي يظهر في الطبيعة ما هو إلا نتاج التجوية المتباينة differential wearthering، التي تحدث بمعدلات مختلفة نتيجة تباين الصخور في التركيب والبنية وبالتالي في مقاومتها للتجوية (شكل ١ـ١٤). ففي تتابع صخري مؤلف من الغضار الصفحي والحجر الرملي، يُظهر الغضار الصفحي تجاوباً أكثر للتجوية مما يؤدي إلى ظهور الحجر الرملي على شكل تضاريس حادة. وحين تكون الطبقات أفقية تصبح التضاريس متدرجة، بحيث تكون طبقات الحجر الرملي على شكل جروف بارزة بين منحدرات خفيفة من الغضار الصفحي. وحين يكون التطبق مائلاً يبرز الحجر الرملي على شكل أعراف تفصل بينها وهاد منخفضة في الغضار الصفحي.

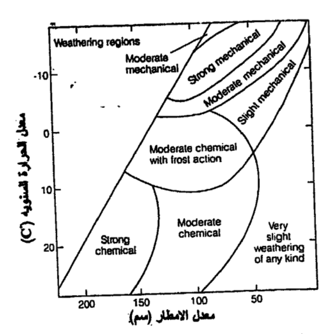
إن مثل هذه الظواهر الطبوغرافية تساعد الجيولوجي في الحقل على توقيع أماكن الصخور المختلفة على الخرائط حسب توزع أنواعها، وبخاصة حين لا تكون التكشفات واضحة للعيان.



**شكل (١-١٤): يوضح التضاريس الناجمة من التجوية المتباينة في الصخور غير المتجانسة.**

**٢- المناخ:** يقصد بالمناخ كمية الأمطار ودرجة الحرارة والرياح. وتتحكم هذه العوامل المناخية في معدل التجوية. كما تحدد بطريقة غير مباشرة نوع الغطاء النباتي وكميته. وعادة تكون المناطق ذات الغطاء النباتي الكثيف لها تربة سميكة غنية بالمواد العضوية المتحللة، التي تشتق منها المحاليل الكيميائية النشطة مثل حمض الكربون Carbonic acid والحموض الدبالية humic acids.

وهكذا فإن الرطوبة وارتفاع الحرارة تزيدان من وطأة الفعل الكيميائي، لذلك لا يكون من المستغرب أن تكون التجوية الكيميائية أكثر تعمقاً في الصخور الواقعة في المناخ الدافئ والرطب، بالمقارنة مع صخور المناخ البارد والجاف (شكل١-١٥).

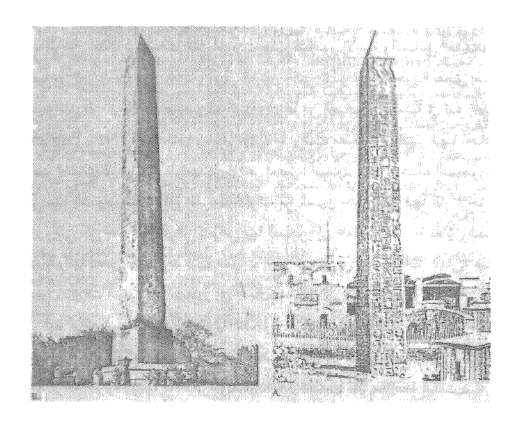



شكل (١-١٥): يوضح تأثير المناخ في عمليات التجوية.

كذلك فإن المناخ يؤثر في الطبوغرافية الناتجة من التجوية. فصخور الحجر الكلسي والرخام المؤلفة بمعظمها من فلز الكالسيت القابل للانحلال، تكون حساسة جداً للتجوية في المناخ الرطب، ويظهر ذلك في مناظرها الطبيعية. وتظهر هذه الصخور على شكل جروف بارزة وحادة في المناطق الجافة، لأن معدل الأمطار يكون ضعيفاً والحياة النباتية فيها تتوزع على شكل بقع صغيرة. ففي مثل هذه الشروط يكون تأثير الفعل الميكانيكي للتجوية قوياً وتأثيره واضحاً.

ومن الأمثلة النموذجية التي تبين أثر المناخ في معدل التجوية الكيميائية نذكر مسلة كليوبترة Cleopatra's Needle الغرانيتية التي صمدت ألوف السنين في مناخ مصر الجاف، وبقيت محتفظة بكتابتها الهيروغليفية قرابة ٤٠٠٠ سنة، لكنها تأثرت بالتجوية بعد نقلها إلى حديقة سنترال بارك Central Park في نيويورك منذ ١٠٠ سنة، بسبب تعرضها لجو المدينة الرطب، وأزيلت كتابتها الهيروغليفية من الجانب المواجه للرياح، خلال أقل من ٧٥ سنة (شكل ١-١٦). فمناخ نيويورك الرطب هو المسؤول عن زيادة عمل التجوية، بالإضافة إلى الجو الملوث لهذه المدينة

الذي يحوي حمض الكبريت، وغيرها من الملوثات التي لم تتعرض لها هـذه المسـلة في أجواء مصر القديمة.



**شكل (١-١٦): تأثير التجوية الكيميائية في مسلة كليوبترة الغرانيتية.**

A - المسلة قبل نقلها من مصر. B - بعد نقل المسلة إلى الحديقة المركزية فـي نيويـورك. ويلاحظ اهتراء سطوحها الخارجية وبخاصة السطح المواجه للرياح الذي طمست كتاباته الهيروغليفية بعد مرور (٧٥) عاماً.

**٣- التضاريس والطبيعة الطبوغرافية:** إن وضع التضاريس يمكن أن يتحكم بشكل غير مباشر في كمية الأمطار وفي نوعية الغطاء النباتي وكثافته، كما أن طبيعة الانحدار لها تأثير في معدل التجوية. وحين تكون الصخور المجواة على منحدر شديد، فإن مياه الأمطار تغسل المنتجات الصلبة إلى أسفل المنحدر، وبالتالي تفسح المجال ثانية لتعرض السطوح الصخرية للتجوية. وبذلك تكون سماكة غطاء الأنقاض الناجم من التجوية قليلة. أما في المنحدرات اللطيفة فتبقى منتجات التجوية في أماكنها، ويتراكم بعضها فوق بعض حتى إنها قد تصل أحياناً إلى سماكة (٥٠) متراً أو أكثر.

**٤- الزمن:** دلت الدراسات التي أجريت على صخور الأبنية والتماثيل القديمة، أن الصخور الصلبة تحتاج إلى مئات وألوف السنين حتى تؤثر فيها التجوية لعمق بضعة ميلمترات. فقد لوحظ أن صخور الغرانيت وغيرها من الصخور القاسية في نيو إنجلند New England واسكندنيافيا وجبال الألب ما زالت مصقولة وتظهر فيها أخاديد الحت الجليدي،الذي يعود تاريخها إلى أواخر العصر الجليدي. وتحتاج هذه الصخور في مثل هذه الشروط المناخية إلى عشرات الألوف من السنين حتى تظهر فيها آثار التجوية.

وعلى كل حال فالمناطق التي تتعرض فيها الصخور إلى عمليات التجوية لملايين السنين فإن تأثيراتها تتعمق كثيراً. وقد دلت عمليات الحفر المنجمي في بعض المناطق المدارية على وصول تأثيرات التجوية في الصخور إلى أعماق قد تصل إلى (١٠٠) متر أو أكثر.

لقد تم التعرف على معدلات تجوية الصخور بطرائق عديدة: أولاً بوساطة الدراسات التجريبية التي صممت تجاربها بحيث يتم التحكم بالزمن عن طريق تسريع الفعل الكيميائي برفع درجة الحرارة وزيادة الماء اللازم وتصغير حجم الحبات. ثانياً ملاحظة عينات صخرية يعرف تاريخها. وثالثاً بوساطة دراسات التأريخ بالنظائر المشعة لرسوبات أو صخور تعرضت للتجوية خلال ألوف أو ملايين السنين. وقد توصلت جميع الدراسات السابقة إلى أن المعدلات الوسطية للتجوية تتناقص مع الزمن. إذ إن المتبقيات الناجمة من تجوية البازلت مثلاً تكون ثابتة تجاه المؤثرات الكيميائية للتجوية، كما أن ازالتها من فوق صخورها تتضاءل تدريجياً، وكلما زاد بنيانها أكثر كلما تناقص معدل التجوية. وعلى كل يحتاج ذلك إلى زمن طويل، ربما نصف مليون سنة أو أكثر، قبل أن يبدأ معدلها بالتناقص إلى حد يصل فيه إلى درجة من الثبات.

# التربـــــة وتشكلـــها

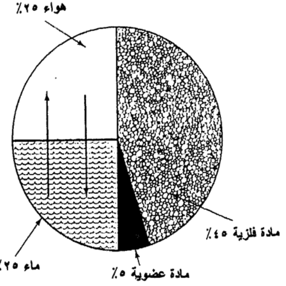
التربة soil لها أهمية اقتصادية كبيرة، ويمكن أن يقال عنها انها الجسر بين الحياة وعالم الجماد inanimate world. وتعرف التربة بأنها الوسط الطبيعـي الـتي تنمـو فيها النباتات. وتتميز بظهورهـا علـى هيئـة طبقـات تسـير موازيـة لسـطح الأرض، وتتألف من الشظايا الصخرية المحواة والحبات الفلزية إضافة إلى الرطوبـة والغـازات. ويدعى علم التربة بالبيدولوجيا Pedology. وهو من الفروع الحديثة للعلوم، وعلم أساسي في الزراعة، كما أن علاقتـه مـع الهندسـة وإدارة استخدام الأراضـي تتوثـق أكثر فأكثر.

يستخدم اصطلاح الريغوليت regolith لمجمل الغطاء الفتاتي الواقع فـوق المهـد الصخري. ويمكن أن يتألف من البقايا الناجمة من تجوية الصخـور المحليـة،أو أنـه قـد يكون منقولاً بالرياح،أو بالمياه أو بفعل عوامل أخرى، ولهذا يكون الريغوليت متبقياً residual أو منقولاً transported.

## تركيب التربة composition of soil

تتألف التربة من شظايا الصخور والفلزات التي تشكلت بالتجوية. أمـا الفـلزات فهي بالدرجة الأولى من الغضاريات والكوارتز مع كميات أقل من أكاسيد الحديـد والألمنيوم. وعادة تحوي التربة الناتجة من تجوية غير كاملة بالإضافة إليها، عـدداً مـن الفلزات الأخرى. أما المكونات الأخرى للتربة فهي الغازات والمواد العضوية والمـاء. أما الغازات فهي الموجـودة في الغـلاف الجـوي بالإضافـة إلى الغـازات الناجمـة مـن النشاط العضوي المحلي. وأما المواد العضوية فتتكون من جذور النباتات وغيرها مـن الأجزاء النباتية الحية مع ما يتبقى من تفسخ المواد العضوية. وبـالرغم مـن أن نسـب

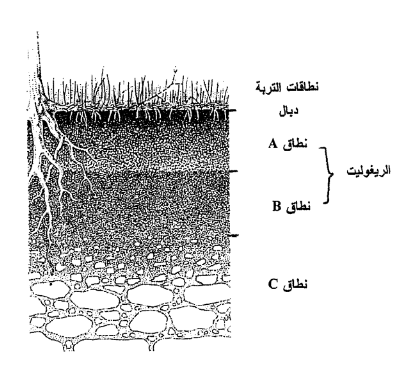
هذه المواد قد تختلف، إلا أن المكونات الأساسية للتربة تبقى ثابتة (شكل ١ـ١٧). ويتكون نحو نصف الحجم الكلي لتربة سطحية جيدة من خليط من مواد صخرية مفتتة ومتحللة ومواد عضوية، أما النصف الباقي فيشغله فراغات يتخللها الهواء والماء.




شكل (١ـ١٧): التركيب الحجمي لتربة ذات شروط جيدة لنمو النباتات.

## مقطع التربة

حين نلاحظ التربة على طرف جرف أو على جدار خندق حديث الحفر يمكن تمييز تطبقها. تتألف التربة عادة من طبقتين أو ثلاث طبقات وأحياناً أكثر. ومع استمرار عمليات التجوية أثناء تشكل التربة، فإن ذلك يؤدي إلى تشكل الطبقات فيها. وعندما تكون التربة بدون طبقات مميزة، أو ذات تطبق قليل الوضوح فإنه يقال عنها إنها تربة غير ناضجة immature soil، بينما تكون التربة ذات الطبقات واضحة المعالم تربة ناضجة mature soil. وتدعى طبقات التربة المميزة عن بعضها البعض بالنطاقات zones، ولكل نطاق مجموعة من الخصائص المميزة، أما مقطع التربة فيشمل مجموعة النطاقات من السطح حتى المهد الصخري (شكل١ـ١٨).




شكل (١ـ١٨): مقطع في تربة ناضجة يوضح النطاقات الثلاثة.

تعرف الطبقة العليا من قبل العاملين في دراسة التربة بالنطاق A، كما تدعى بالتربة العليا top soil أو التربة السطحية surface soil. وقد يكون الجزء الأعلى منه غنياً بالمادة العضوية ويدعى الدبال Humus، الذي يجعل التربة خفيفة الوزن وجيدة التهوية ويخدم كمصدر للنيتروجين الضروري للحياة النباتية. ويظهر النطاق A واضحاً بسبب الغسل المستمر بالمياه السطحية التي تحل كثيراً من مواده الكيميائية. وتنتج النباتات التي تعيش فيه، ثنائي أوكسيد الكربون الذي يشكل مع الماء حمض الكربون، كما تتشكل حموض عضوية في الدبال. وتتفاعل هذه المواد الحمضية مع التربة مؤدية إلى تحرر كثير من المواد المغذية للنباتات. إلا أن حركة المياه قد تغسل معظم هذه المواد من هذا النطاق وتحملها باتجاه الأسفل، مما يفقره

بالمواد الضرورية للنباتات. وعندما تغسل أكاسيد الحديد من التربة العليا فإن لونها يصبح فاتحاً. ولكن يبقى الجزء العلوي منها قاتم اللون لاحتوائه على الدبال.

يقع تحت التربة السطحية مباشرة النطاق B وكثيراً ما يعرف هذا النطاق بالتربة السفلية subsoil، وتحتوي على المواد والمعادن والفلزات التي غسلت من النطاق A، وقد تتراكم فيها فلزات الغضار وأكاسيد الحديد وغيرها من المواد. ويساعد وجود الغضار فيها على تماسكها، وتصبح أكثر صلابة بوجود أكاسيد الحديد كما تقل نفوذيتها، لذلك يكون نمو الجذور فيها أكثر صعوبة. ويشكل النطاقان معاً ما يدعى السولوم Solum أو التربة الحقيقية true soil. وفي السولوم تنشط عمليات تكوّن التربة، وينحصر فيه بشكل كبير وجود الجذور الحية ونشاطات النباتات والحيوانات الأخرى.

وقد توجد تحت النطاق B طبقة من المواد المفككة والمكسرة المشتقة من الصخر الأم وتشكل النطاق C. وحين غيابه فإنه يحتمل وجود صخر مهد غير مجوى ويدعى في هذه الحالة النطاق R.

وهنا تجدر الإشارة إلى أنه لا يوجد في حالات كثيرة خطوط حادة فاصلة بين طبقات التربة المختلفة، إذ يتدرج التغيير من طبقة لأخرى. بالإضافة إلى ذلك فإن هناك ترباً تفتقد وجود النطاقات كلياً وهي ترب غير ناضجة وتوجد في السفوح شديدة الانحدار.

## العوامل المتحكمة في تشكل التربة Factros control the soil formation

تمثل التربة النواتج النهائية لتضافر عدة عوامل منها جيولوجية ومناخية وعضوية وطبوغرافية عملت خلال فترات زمنية متفاوتة. وإن هذه العوامل يعتمد بعضها على بعض إلا أنه من المفيد أن ندرس دور كل منها على حده.

١ـ العامل الجيولوجي: كان العلماء يعتقدون بأن تركيب المهد الصخري bedrock[1] هو العامل الأساسي في تكوين التربة، ومن هنا جاء تقسيم التربة إلى مجموعتين:

أ ـ التربة المتبقية residual soil: وهي التي اشتقت من الصخور الموجودة تحتها ويلاحظ فيها انتقال تدريجي إلى ما تحت التربة ومنها إلى الصخر الأم. نذكر منها التربة الكلسية Limestone soil والتربة الرملية Sandstone soil والترب البازلتية والغرانيتة....الخ.

ب ـ التربة المنقولة transported soil: وهي تربة نقلت من أماكن تشكلها إلى أماكن أخرى. وقد يتألف بعضها من مواد غير متأثرة بعمليات التجوية الكيميائية. ويرجع وجودها في مكانها إلى عوامل النقل المختلفة مثل الرياح والأمطار والأنهار والجليديات. ويتراوح حجم جزئياتها من حبيبات ناعمة جداً إلى حصى كبيرة بالاضافة إلى الاختلاف في تركيبها الكيميائي، نذكر منها التربة اللحقية alluvial soil والتربة الجليدية glacial soil والتربة الهوائية eolian soil والتربة البحيرية lacustrine soil والتربة البحرية marine soil. وتمتاز التربة الجليدية بخصوبتها، لأنها تمثل صخوراً مطحونة احتفظت بجميع عناصرها.

ولكن فيما بعد اتضح لعلماء التربة بأن هناك عوامل أخرى أكثر أهمية من العامل الجيولوجي وبخاصة المناخ. وفي الحقيقة فقد وجد أن أنواعاً متشابهة من التربة تنتج غالباً من صخور أمهات مختلفة. وإن أنواعاً مختلفة من التربة تنتج من صخور متماثلة.

٢ـ عامل المناخ: يعد المناخ من أهم العوامل المتحكمة في تشكل التربة، حتى إننا نستطيع أن ننسب ترباً معينة إلى مناخ معين. ويكون تأثير هذا العامل بشكل مباشر من حيث الحرارة وهطول الأمطار. فمثلاً يمكن أن ينتج المناخ الرطب والحار طبقة سميكة من التربة المجواة، في الفترة الزمنية نفسها، التي ينتج فيها المناخ البارد والأقل رطوبة طبقة رقيقة من الفتات الصخري المجوى ميكانيكياً. بالإضافة إلى ذلك فإن

---

[1] يعرف أحياناً المهد الصخري بالصخر الأم parent rock.

المعدل العالي من الأمطار يغسل المواد الفلزية من الطبقة السطحية وتُفقر التربة من المواد المخصبة. وبالمقابل فإن المعدل المطري المنخفض قد يؤدي إلى تبخر المياه من الطبقة السطحية أو تشكل قشرة سطحية نتيجة الجفاف. وفي النهاية فإن المناخ يتحكم في نوع الحياة النباتية والحيوانية السائدة في التربة وفي تشكل الدبال.

**٣ـ عامل الزمن:** وهو العامل المهم في تحديد سماكة التربة ودرجة نضوجها. فالتربة الناضجة تظهر مستوياتها تامة التكوين، وهذا دليل على أن العوامل المختلفة التي كونتها قد تضافرت لفترة زمنية كافية. بينما يكون العكس في التربة غير الناضجة. ولكن ما هو الوقت اللازم لتشكل التربة؟ يمكن أن تتطور التربة بشكل كامل، في المناطق المعتدلة، خلال بضع مئات أو بضعة ألوف من السنين. أما في المناخ البارد، حيث تكون التجوية بطيئة، فإن تشكل التربة يكون شبه معدوم. ويمكننا أن نلاحظ في بعض المناطق أن الصخور بقيت غير مجواة بشكل ملحوظ مدة ١٠,٠٠٠ أو ٢٠,٠٠٠ سنة خلال العصر الجليدي. وبالمقابل يمكن أن تتشكل تربة بسماكة متر خلال قرن واحد على سطح صخور بركانية، في مناطق مدارية، مثل جزر الهاواي، وهذا التطور السريع للتربة أمر غير عادي بالمقارنة مع تطور الترب في أنحاء العالم.

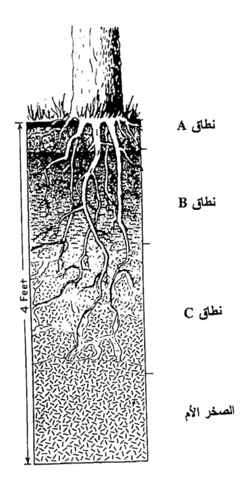
**٤ـ العامل العضوي:** يعتقد كثير من علماء التربة أن عمليات تكوين التربة لا تبدأ إلا عندما تتداخل العوامل الحياتية في التفاعل بين المهد الصخري وبيئته. إن المصدر الأساسي للمواد العضوية هو النباتات مع بعض المساهمة من الحيوانات والكائنات المجهرية. فالنباتات تؤثر في تفتيت التربة وتحللها، كما أن نشاط البكتريات والفطريات يساعد على تحلل بقايا النباتات والحيوانات لتعطي الدبال وينتج منها عدة حموض عضوية تنشط عمليات التجوية. وكذلك تعمل الديدان الأرضية والنمل على قلب التربة وحفرها، مما يسهل مرور الماء والهواء خلالها. يضاف إلى ذلك أن بعض الكائنات المجهرية تساعد على تثبيت النيتروجين الجوي في التربة. إن جميع هذه العضويات تعمل على إخصاب التربة والحصول على تربة ناضجة، إذا كانت العوامل الأخرى مناسبة.

**٥- العامل الطبوغرافي:** تؤثر الطبوغرافيا بشكل واضح في خواص مقطع التربة. إذ إن انحدار سطح الأرض يتحكم بجريان المياه وتعرية المواد الناجمة من التجوية. لأن إزالة المواد المفككة يسهل أكثر كلما كان الانحدار شديداً، وبذلك يعيق تراكم مواد التربة ويوقف تطورها. أما في الانحدار الخفيف فإن المواد المفككة تبقى في أماكنها مما يساعد على عملية نضج التربة. وتساعد الأماكن المستنقعية المنخفضة، التي تفتقر للجريان، على تطور الترب المستنقعية **bog soils** التي تكون غنية بالمواد العضوية ومشبعة بالمياه. إن الطبوغرافيا المثلى لتكون تربة ناضجة هو سطح مرتفع مستوٍ أو متموج، حيث يكون الصرف جيداً إلى جانب الحد الأدنى من التعرية، وتسرب كمية مناسبة من المياه إلى التربة.

إن عملية تكون التربة عملية معقدة تتضافر فيها وتتداخل عوامل مناخية وعضوية وجيولوجية لفترات زمنية طويلة لتنتج تربة ناضجة. ولا نستطيع أن ننسب نوعاً معيناً من التربة إلى عامل واحد.

## نماذج التربة soil types

**١- تربة البيدالفير Pedalfer soil:** أتت هذه التسمية من الكلمة اليونانية pedon وتعني تربة، والرموز الكيميائية Al و Fe تمثل الحديد والألمنيوم. وتعرف أيضاً بالتربة الحديدية الألومينية (شكل ١- ١٩).

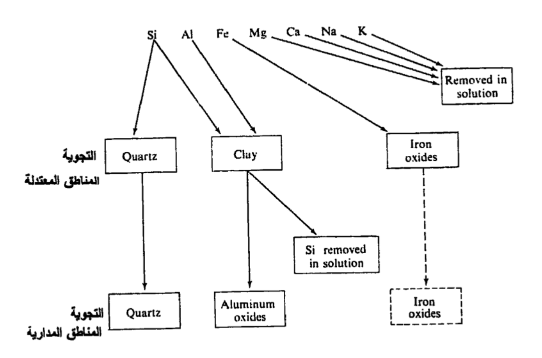



**شكل (١-١٩): تربة البيدالفير التي تطورت فوق صخور غرانيتية.**

تتكون هذه التربة في غابات المناطق المعتدلة فوق صخور أمهات سيليسية الومينية (مثل الغرانيت). حيث تؤدي الأمطار إلى وجود غطاء نباتي كثيف وتشكل الدبال بنسبة عالية. فمياه الأمطار تصبح حامضية جداً بتفاعلها مع الدبال، وتنقل المواد قليلة الانحلال (الغضاريات وأكاسيد الحديد وأكاسيد الالمنيوم) من النطاق A إلى النطاق B وتعطيه اللون البني المحمر. أما الكربونات المنحلة فتغسل من النطاق السطحي وتحمله المياه الجوفية. ويصبح هذا النطاق مؤلفاً من حبات كوارتزيه مغسولة.

**٢- تربة اللاتيريت laterite soil**: تتشكل هذه التربة في غابات المناطق المدارية فوق صخور أمهات سيليسية الومينية (نارية غنية بالصفاح). تتكون هذه التربة من

طبقة رقيقة من المواد العضوية، تليها طبقة أخرى قد تم غسلها من جميع المواد السيليكاتية بوساطة الأمطار الغزيرة، يميل لونها إلى الأحمر، وتمتد إلى أعماق بعيدة، ويصعب في هذا النوع من التربة تمييز النطاقات الثلاثة (شكل ١ـ٢٠).




**شكل (١ـ٢٠): تلخيص مبسط للتجوية يوضح تشكل اللاتيريت.**

يبدو أن عملية الغسل هي المسيطرة بسبب الأمطار الموسمية الغزيرة. وتغسل المياه كل شيء بما فيها السيليكا والغضار، وتحملها بعيداً، ما عدا الحديد والألمنيوم اللذين يشكلان أكاسيد مائية. ومن الواضح أن الباكتريا تخرب الدبال في درجات الحرارة العالية، ومن ثم فالمياه لا تكون حامضية ولا تستطيع إزالة أكاسيد الحديد والألمنيوم[1]. ثم إن هبوط المياه في باطن التربة وحملها للذرات الغضارية وتوضعها

[1] ـ يسمى الخليط من أكسيد الحديد المائي Fe2O3. nH2O وأكسيد الألمنيوم المائي AL2O3. nH2O البوكسيت Bauxite.

في الطبقة السفلية على شكل طبقة غضارية صماء مما يعيق نمو الجذور. تُعرف التربة التي تشكلت في هذه الشروط باللاتيريت[1].

يكون اللاتيريت أحمر اللون، قليل الخصوبة، وحين يقطع أو يوضع في قوالب ويجفف تحت الشمس ثم يشوى يعطي القرميد (الآجر). ويمكن أن يستفاد من اللاتيريت في استخلاص الحديد والألمنيوم.

**٣ـ تربة التشيرنوزوم Chernozom:** توجد هذه التربة في السهوب الروسية وتتشكل في ظروف مناخية خاصة، أهمها موسمية الأمطار، حيث تموت الأعشاب في فصل الجفاف وتبدأ بالتحلل، وبخاصة أن فصل الجفاف هو فصل برودة، كما أن الأمطار لا تكون غزيرة بشكل كاف لغسل المواد العضوية والمعدنية منها. لذلك تمتاز هذه التربة بخصبها وبغناها بكل العناصر الضرورية لنمو النباتات. ولا يظهر في مقطع هذه التربة سوى النطاق (A) ويمتاز بتراكم مواد عضوية وتحللها إلى درجة كبيرة، ويكون بلون أسود لذلك أطلق عليها التربة السوداء.

**٤ـ تربة الصحارى:** من أهم خصائص هذه التربة تشكل قشرات قد تكون كلسية أو سيليسية أو ملحية، أو قشرات صحراوية تكون بنية اللون أو سوداء مؤلفة من أكاسيد الحديد والمغنيزيوم. تتشكل هذه القشرات نتيجة لصعود المياه التي تحتويها التربة بفعل الخاصة الشعرية إلى الطبقات السطحية، فتتبخر المياه وتترسب الأملاح على شكل قشور.

**٥ـ الترب القديمة paleosoils** وتسمى أحياناً الترب المستحاثة fossil soils. إن دراسة الترب القديمة لها أهمية كبرى في معرفة الأحوال المناخية والطبوغرافية القديمة التي تشكلت فيها. فهي تساعد على إعادة بناء التاريخ الجيولوجي للأرض. ومن أمثلتها: الترب التي تشكلت عقب العصر الجليدي، ثم حفظت بطمرها برواسب ريحية أو نهرية.

---

[1] ـ أتت هذه التسمية من اللاتينية ويعني القرميد، لونها الأحمر البني يشبه اللون القرميدي.

# الفصل الثاني

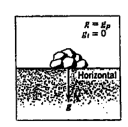
## تبـــدد الكتــل

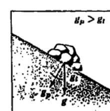
تعد التجوية واحدة من صلتي الوصل الرئيستين ما بين الصخور الأصلية والرسوبات المشتقة منها. أما الصلة الثانية فهي تبدد الكتل mass wasting، التي تحرك نواتج التجوية الصلبة (الريغوليت regolith) من الأعالي إلى أسفل المنحدرات بفعل الثقالة الأرضية gravity، دون تدخل الأوساط الناقلة المائية أو الهوائية أو الجليدية. ومع أن الثقالة هي القوة الفعالة المتحكمة في عملية تبدد الكتل، غير أنه هناك عوامل أخرى، كالماء وزيادة الوزن والانحدار الشديد، تلعب دوراً هاماً في حركة الكتل. فالماء المتشرب في الريغوليت يملأ الفراغات المسامية ويقضي على تماسك جزئياته، مما يسمح له بالانزلاق بسهولة كبيرة، وكذلك وجود الماء في الفتات الصخري والطين يؤدي إلى زيادة ملحوظة في الوزن لدرجة كافية لتسبب الانزلاق أو التدفق، ولهذا تنشط عمليات التبدد إثر هطول أمطار غزيرة لفترة طويلة. وبالحقيقة ليس من السهل أن نفصل بين التجوية وتبدد الكتل أو عمليات الحت، لأنها تشكل مع بعضها بعضاً عمليات متصلة ومستمرة ومتداخلة في أفعالها المتبادلة. وهي جميعها تؤدي إلى تخريب الصخور الصلبة، وإعادة توزع المواد الناتجة منها.

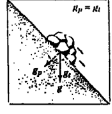
## الثقالة والمنحدر

قد يبدو لنا للوهلة الأولى حين نلاحظ منحدراً تغطي سطحه النباتات، أنه قد وصل إلى درجة من الثبات حيث لا يظهر عليه دلائل النشاط الجيولوجي. ولكن عندما نفحص الأنقاض الصخرية الواقعة تحت هذا الغطاء النباتي، نجد فيه كتلاً وقطعاً صخرية وحصى ورمالاً مشتقة من صخور المهد التي تتكشف في أعلى المنحدر. كما نلاحظ أنها قد ابتعدت متحركة نحو الأسفل بعيداً عن مصدرها. أما السبب الذي دفع هذه المواد للتحرك نحو أسفل المنحدر فهو الثقالة الأرضية، التي تشد الأجسام إلى سطح الأرض.

فإذا كان جسم معين يقع على سطح أفقي فإن الثقالة تثبته في مكانه. أما حين يقع على سطح مائل فإن قوة الثقالة تتحلل إلى قوتين احداهما موازية للسطح (gt) تشده نحو الأسفل، والثانية عمودية على السطح (gp) تعمل على تثبيته كما في الشكل (٢-١).




**شكل (٢-١): تأثير الجاذبية الأرضية في الأجسام المتوضعة على منحدر ما.**

عندما تتغلب gt على gp يتحرك الجسم نحو الأسفل، وحينئذ نقول إن الانحدار تجاوز زاوية السكون[1] angle of repose، التي تتراوح بين (٢٥° ـ ٤٠°) درجة. وذلك بناءً على حجم وشكل الحبات. فكلما زاد حجم الحبات وكانت اشكالها زاوية

[1] الزاوية الأعظمية التي تبقى فيها الأجسام مستقرة على سطح مائل.

الأطراف زادت زاوية سكونها، بينما لا تستقر الحبيبات المدورة والناعمة على سطوح يزيد ميلها على (٣٠°) درجة.

حين توجد كتله صخرية على قمة مرتفع أو جبل، فإن وصولها إلى هذا المكان نجم من تأثير قوة رافعة تغلبت على قوة الثقالة، لذلك يكون لهذه الكتلة الصخرية طاقة كامنة potential energy تُعرف بالطاقة المختزنة stored energy. وبهذا تكون الطاقة الكامنة (E) لكتله صخرية (m) رفعت إلى الارتفاع (h) هي:

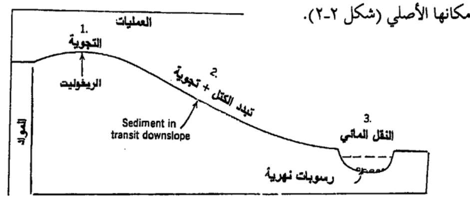
$$E = m.g.h$$

حيث تكون (g) التسارع الناجم من قوة الثقالة.

وهناك في الطبيعه أمثلة كثيرة مشابهة، فعندما ترتفع الرطوبة في أعالي الجو على شكل غيوم بتأثير الطاقة الشمسية تكتسب طاقة كامنة. وحين تساقطها على شكل أمطار تتحول إلى طاقة حركية kinetic energy (E). وهي الطاقة الناجمة من حركة الجسم. فالطاقة الحركية (E) الناتجة من هبوط كتلة صخرية (m) تتحرك بسرعة (v) هي: $E = 1/2\ m\ v^2$. وبهذا نستطيع أن نقول إن تحرك الكتل الصخرية على سطوح المنحدرات نحو الأسفل ينجم من تحول الطاقة الكامنة إلى طاقة حركية.

## حركة الأنقاض الصخرية على المنحدرات

إن أي جسم يتحرر من صخور المهد بأفعال التجوية هو ناتج فتاتي أو ريغوليتي. وجميع المواد الفتاتية في الأماكن المرتفعة لها طاقة كامنة تدفعها للتحرك نحو الأسفل مبتعدة عن مصدرها. وقد تصل إلى أحد الأوساط الناقلة حيث تحملها إلى أماكن بعيدة جداً عن مكانها الأصلي (شكل ٢-٢).




شكل (٢-٢). علاقة تبدد الكتل بالتجوية من جهة والنقل المائي من جهة ثانية.

يمكن أن نتصور أن أحداث تبدد الكتل كنظام مفتوح open system يتضمن إنتاج الكتل (ادخالاً) وتبددها (إخراجاً). أما الإنتاج فهو المواد الصلبة الناتجة من التجوية. بينما يكون الإخراج هو تحركها على المنحدر باتجاه الأسفل، حيث يمكن أن تُحمل بوساطة الأوساط الناقلة. وعندما يتعادل الإدخال والإخراج فإن نظام التبدد يكون نظاماً متوازناً، وفي هذه الحالة يكون للمنحدر ميل يسمح في أية نقطة منه بتحرك كمية من الفتات الصخري نحو الأسفل، وأن تضاف كمية معادلة لها.

لا يقتصر حدوث تبدد الكتل على اليابسة بل يحدث أيضاً تحت البحر، في الأماكن التي تتراكم فيه الرسوبات على سطوح شديدة الانحدار كالمنحدر القاري، حيث يؤدي استمرار التراكم أو حدوث هزة أرضية إلى حالة عدم توازن فتنحدر نحو الأعماق، لتفرش مساحات واسعة من قيعان البحار (الانزلاقات تحت البحرية). ولقد أظهر المسح الطبوغرافي تحت البحر وجود سطوح منحدره على امتداد حواف القارات وبعض الجزر التي تحدث فيها انزلاقات أرضية. وعلى هذا يمكن أن تجري عمليات تبدد الكتل في كل أنحاء العالم أينما وجد الفتات الصخري على سطوح منحدرة.

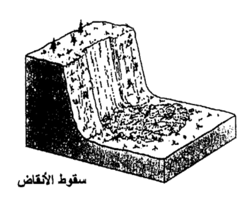
## تصنيف عمليات تبدد الكتل:

تستعمل كلمة انزلاق الأراضي land slide، من قبل كثير من الناس والجيولوجين، لوصف جميع أنواع التبدد المعروفة بما في ذلك تلك التي لا دور لحركة الانزلاق في حدوثها. وذلك للتعبير عن هذه العمليات وتبسيط كثير من الصفات المميزة، وأشكال اليابسة التي تدخل في حركات تبدد الكتل. وعلى الرغم من اختلاف عمليات تبدد الكتل في نواحٍ معينة، إلا أنها تشترك في صفة واحدة وهي أنها تحدث فوق المنحدرات.

بالرغم من أن عمليات تبدد الكتل هي عمليات حركيّة معقدة، إلا أنه يمكن تصنيفها اعتماداً على نوع المواد ونمط الحركة وسرعتها إلى: السقوط والانزلاق والهبوط والتدفق، وهي عمليات سريعة الحركة، بالاضافة إلى العمليات شديدة البطء.

## ١ـ عمليات تبدد الكتل سريعة الحركة

**أ ـ سقوط الصخور والأنقاض الصخرية:** هي سقوط قطع من الصخور المفككة، بصرف النظر عن حجم هذا القطع، سقوطاً حراً بعد انفصالها عن صخور المهد. وتحدث عادة في منحدرات شديدة الميل، كحافة جرف صخري أو قمة منحدر شديد. وتجري حوادثه على نطاق محدود بسبب تناوب التجمد والذوبان. وقد يقتصر السقوط على مفتتات وقطع صخرية، أو يشمل انهياراً مفاجئاً لكتلة صخرية ضخمة تتحطم حين تصطدم بالأرض ويتدحرج حطامها وينزلق ولا يوقفه إلا عامل الاحتكاك في أسفل المنحدر (شكل ٢ـ٣).



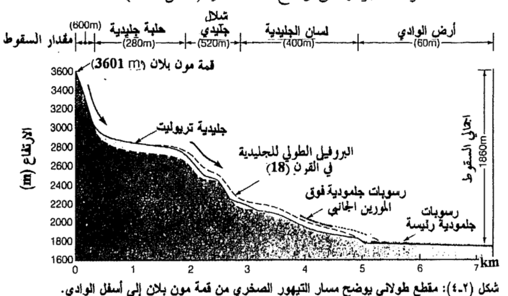




شكل (٢ـ٣): سقوط الصخور وسقوط الأنقاض.

يمكن أن نُعرِّف عمليات السقوط بأنها عمليات مباغتة وسريعة لكتل صخرية تنفصل من صخور المهد بشكل فجائي هابطة نحو الأسفل. ويكون تأثير هذه الحوادث محدوداً إذا ما قورن بالتيهور الصخري rock avalanches الذي يحدث عادة إثر انفصال كتل صخرية ضخمة تنهار من أعالي الجبال فوق الجليديات وتراكمات الثلوج، وتنزلق وتتدحرج جارفة معها كميات هائلة من الثلوج إلى مسافات بعيدة، وبسرعة كبيرة جداً مؤدية إلى أحداث كارثية على حياة الانسان وممتلكاته ومنشآته في المناطق الجبلية.

ومثال ذلك ما حدث في المناطق المأهولة من جبال الألب. ففي شهر أيلول من عام ١٧١٧ انفصلت كتل صخرية ضخمة من قمة جبل مون بلان Mont Blanc الواقع على الحدود الفرنسية الايطالية وسقطت فوق جليدية تريوليت Triolet Glacier. وقد تحركت هذه الكتلة الصخرية مع الجليد المنساق معها بسرعة كبيرة متجهة نحو أسفل الوادي، ودمرت في طريقها قريتين لتستقر على مسافة ٧كم من الصخر المهد التي انفصلت عنه. وكان هبوطها من ارتفاع ١٨٦٠ متراً (شكل ٢- ٤).




**شكل (٢-٤): مقطع طولاني يوضح مسار التيهور الصخري من قمة مون بلان إلى أسفل الوادي.**

سقطت كتلة صخرية ضخمة من قمة مون بلان التي هي على ارتفاع ٣٦٠١م إلى ارتفاع ٣٠٠٠م، حيث اصطدمت بالجليدية تريوليت ثم تحركت بسرعة كبيرة على وسادة ثلجية هوائية إلى أسفل المنحدر. مما أدى إلى طمر قريتين مع جميع القاطنين فيها.

وقد قدرت السرعة التي وصلت إليها الكتلة الصخرية بـ ١٢٤كم/سا والزمن الذي استغرقته في تحركها مسافة ٧كم هو ما بين (٢-٤) دقائق.

ومن الصعب جداً ملاحظة التيهور الصخري حين حدوثه. ويفترض أن الحركة السريعة ناجمة عن تغليف الصخور المنهارة بالجليد المفكك والثلج، بالإضافة إلى الهواء المحجوز والمضغوط بينها وبين سطح المنحدر، الذي يقوم بدور وسادة هوائية، مما يجعل الصخور المنهارة قادرة على الحركة فوق سطح بهيئة ملاءة مرنة طافية،

مشـــابهة تمامـــاً للوســـادة الهوائيـــة الـــتي تتحـــرك فوقهـــا مراكـــب الهوفركرافـــت hovercraft.

و لم تكن هذه الكارثة الأولى والأخيرة فقد تحدث في كثـير مـن المنـاطق الجبليـة الجليدية بدون أية دلالات مسبقة، ولكن العلماء مهتمـون بدراسـة توزعهـا وأزمنـة حدوثها ووضع المصورات اللازمة لتلافي الأخطار المحتملة.

**ب ـ إنزلاق الصخـور والأنقـاض الصخريـة:** هـي إنـزلاق الصخـور والمفتتـات الصخرية غير المتماسكة والحاوية على كميات قليلة من المـاء علـى سـطوح شـديدة الانحدار بحيث تبقى ملاصقة للسطح أثناء حركتها (شكل ٢ـ٥) وقـد يكـون هـذا السطح عبارة عن سطح تطبق أو فواصل وتشققات موازية لسطح المنحدر.





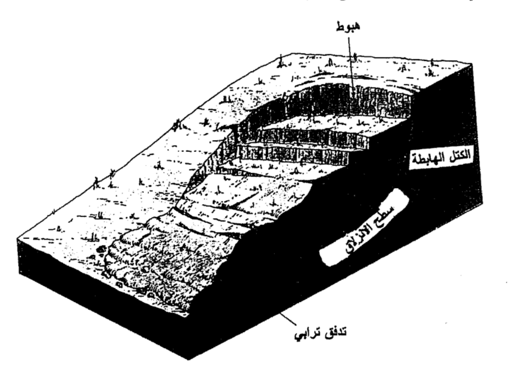


**شكل (٢ـ٥): انزلاق الصخور والأنقاض الصخرية.**

تجري عادة حوادث الانزلاق عندما تكون الطبقات مائلة، أو عند قطـع قـاعدة المنحدر، أو في حالة تشرب الطبقات السفلى للمياه الناتجة من هطول أمطار غزيـرة أو من ذوبان الثلوج، مما يزيـد مـن لزوجتهـا إلى درجـة يقـل فيهـا الاحتكـاك، ولا تستطيع الكتلة الصخرية أو المفتتات البقاء في مكانها فتنزلق على طول المنحدر.

**حـ ـ الهبوط Slump:** وهو نوع خاص مـن عمليـات الانـزلاق. وتتمـيز بتحـرك الكتل الصخرية والمواد غير المتماسكة كوحدة واحـدة أو كوحـدات علـى سـطوح منحدرة مقعرة هبوطاً انزلاقياً. ويرافق هذه الحركة حركة دورانية للكتلـة المتحركـة

حول محور أفقي موازٍ للجرف الذي انفصلت منه الكتلة الصخرية حيث لا تبتعد الكتل المنزلقة كثيراً عن منشئها. وقد تكون الحركة سريعة ومفاجئة أو قد تحصل في فتراتٍ زمنية متباعدة (شكل ٢-٦).

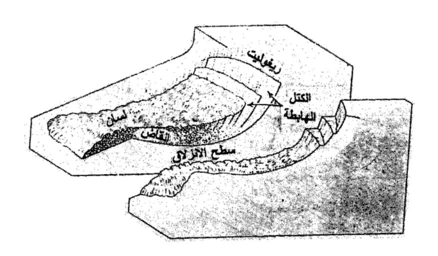



**شكل (٢-٦): يحدث الهبوط بانزلاق الكتل على سطوح منحدره مقعرة.**

تحدث عملية الهبوط في الأماكن المرتفعة التي تتألف من صخور متماسكة تقع فوق طبقات غضارية. فعند تشرب الصخور الغضارية بالماء تنتبج وتشكل سطحاً انزلاقياً للطبقات المستندة اليها، وقد تحدث أيضاً في المنحدرات الشديدة حيث تستند فيها المواد في أعلى المنحدر إلى المواد في أسفله. فحين إزالتها تؤدي إلى حالة عدم استقرار للمواد في أعلى المنحدر وتجعلها تتحرك بفعل الثقالة الأرضية. عادة تترافق عمليات الهبوط مع هطول أمطار غزيرة لفترة طويلة أو نتيجة هزة أرضية. كما يعتقد أنها تعود إلى عملية الحت السفلي للمنحدرات بوساطة المجاري المائية والأمواج. يضاف إلى ذلك أن نشاطات الإنسان في أعمال المقالع أو شق الطرقات وزيادة كثافة الأبنية أو المنشآت على جوانب هذه الطرقات قد تؤدي إلى أحداث مماثلة.

## د ـ التدفقات

**د ـ ١ ـ تدفق الأنقاض debris flow**: وهي أشكال أخرى من انزلاقات الأراضي، التي تشمل تحرك كتل ضخمة من الريغوليت الصخري غير المتماسك المؤلف بأكثر من نصف مواده من حبات أخشن من الرمل. ففي بعض الحالات تكون التدفقات مرافقة لهبوط كبير وتمتد على شكل لسان عند قاعدة الكتلة الهابطة (شكل ٢ـ٧). وقد تحدث أحياناً فوق سفوح المنحدرات في المناطق الممطرة (شكل ٢ـ٨). وتتميز السطوح العلوية لهذه التدفقات بوعورتها حيث تظهر عليها أعراف ومنخفضات قوسية، تشبه في ذلك توضعات جليديات الجبال.



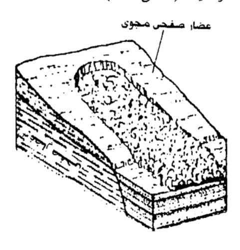

**شكل (٢-٧): رسم نموذجي يوضح تدفق الأنقاض المترافق مع الهبوط.**

تختلف سرعة التدفقات من مكان لآخر حسب طبيعة الانحدار وشروط المناخ، فمن الممكن أن تكون بطيئة جداً لا تتجاوز متراً في السنة، كما يمكن أن تصل أحياناً إلى بضعة كيلومترات في الساعة.



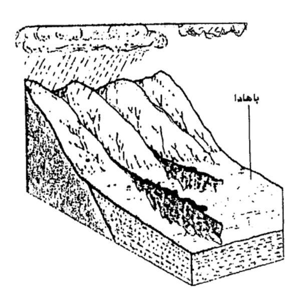

شكل (٢-٨): تدفق الأنقاض فوق سطوح المنحدرات.

**د - ٢ تدفق التراب earth flow**: وهي عمليات وسط بين تدفقات الأنقاض وتدفقات الطين. وتحدث حين يكون الفتات الصخري مؤلفاً بمعظمه من مواد ناعمة بحيث تُصبح أشد تشرباً للماء من مواد تدفقات الأنقاض. والشروط اللازمة لحدوث هذه التدفقات أن تكون موادها غير متماسكة، وتقع على سطوح شديدة الانحدار، وهطول أمطار غزيرة. إن وجودها في حالة عدم توازن يجعلها تتدفق بسبب حدوث هزة أرضية، وعندها يقلل الماء المتشرب فيها من عامل الاحتكاك ويزيد من سيولتها. وعندما تتدفق تحمل معها ما هو موجود فوقها من جلاميد ونباتات وأبنية ومنشآت وغيرها (شكل ٢-٩).




شكل (٢-٩):تدفق ترابي.

د -٣ تدفق الطين **mud flow**: وهي عمليات تؤدي إلى تدفق كميات هائلة من الفتات الصخري الناعم المؤلف بمعظمه من الغضاريات القابلة لتشرب نسبة عالية جداً من الماء، مما يجعلها شديدة السيولة وتتحرك على سطوح شديدة الانحدار صسن الأودية المنخفضة أو في المجاري المائية. ويختلف قوام مواد التدفقات الطينية من قوام العجين الاسمنتي قبل تصلبه إلى قوام الصابون السائل. وغالباً يترافق نشاط هذه التدفقات مع هطول أمطار غزيرة في الأماكن المنحدرة من الخوانق الجبلية. وهي تأخذ عادة شكل نهر من الطين المتدفق الذي يجرف في طريقه الرسوبات من جوانب الأودية وغيرها من المواد المفتتة بما فيها الجلاميد الصخرية. وينتشر التدفق الطيني عند وصوله إلى منطقة سهلية مفتوحة مشكلاً غطاءً مروحي الشكل من الرسوبات الطينية المختلطة مع الرمل والحصى والجلاميد (الباهادا) (شكل ٢-١٠).




شكل (٢- ١٠): التدفقات الطينية وتشكل المراوح اللحقية في أسفل المنحدرات.

إن لعمليات تدفقات الطين أخطاراً تدميرية شديدة بسبب كثافتها العالية التي تجعلها قادرة على جرف أو تدمير ما يصادف طريقها بما فيها الأبنية والمنشآت والسيارات وغيرها. فقد تقتلع الأبنية والجسور من أساساتها، كما يمكن أن تحمل

معها جلاميد صخرية ضخمة قد يزيد قطرها على عشرة أمتار، وتنقلها إلى مسافات بعيدة عن أماكنها الأصلية.

تحدث التدفقات الطينيه غالباً في المناطق الجافة ونصف الجافة، حيث تتوافر شروط الجفاف والمواد الناعمة غير المتماسكة، وانعدام الغطاء النباتي وأمطار فجائية غزيرة، حيث تؤدي إلى ظاهرات جيومورفولوجية مهمة في هذه المناطق،وقد تحدث التدفقات الطينية أيضاً في المناطق البركانية ذات البراكين الانفجارية، التي تطلق مواد ناعمة غزيرة تتراكم بسماكات كبيرة على سفوح البراكين، والأماكن الأخرى المجاورة، حيث يسهل المطر الغزير انزلاقها وتدفقها على السطوح المنحدرة على شكل تدفقات يطلق عليها الأندونيسيون اسم اللاهار Lahar. وغالباً ما تتحرك اللاهارات بسرعة كبيرة وتقطع مسافات طويلة بعيدة عن البراكين، وقد تصل سرعتها إلى ١٠٠كم/سا أو أكثر وتشكل أخطاراً مدمرة تترافق مع انفجارات البراكين. كما حدث في أضخم بركان في كولومبيا، حيث رافق الانفجار عام ١٩٨٥ تدفق طيني هائل اندفع بسرعة كبيرة على جوانب البركان وغمر مدينة أرميرو Armero وقتل أكثر من ٢٠,٠٠٠ نسمة.

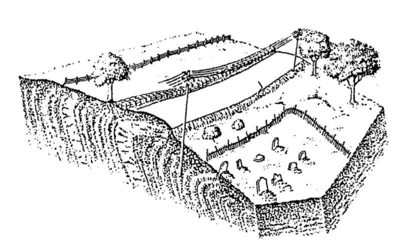
## ٢ـ عمليات تبدد الكتل شديدة البطء

**أ ـ الجمد السرمدي وتموج التربة:** ينتشر الجمد السرمدي permafrost في مناطق قارة القطب الجنوبي ومناطق اليابسة المحيطة بالقطب الشمالي، حيث يكون معدل الحرارة السنوي لهذه المناطق دون الصفر، مما يؤدي إلى تجمد التربه في الشتاء إلى أعماق كبيرة تفوق العمق الذي يصل إليه الذوبان في الصيف. وينتج من ذلك وجود طبقة تحت سطحية دائمة التجلد تعرف بالجمد السرمدي، وهي تبطن ٢٠٪ من سطح اليابسة بالاضافة إلى مناطق القطبين.

**تموج التربة:** يدعى التحرك اللزج والبطيء للتربة والأنقاض السطحية المثقلة بالماء نحو أسفل المنحدرات بتموّج التربة solifluction. تحدث هذه العملية

من تبدد الكتل بخاصة في المناطق المبطنة بالجمد السرمدي. فعندما تذوب التربة السطحية ويبقى ما تحت التربة متجلداً، فإن المياه الناجمة عن الذوبان لا تستطيع التسرب إلى طبقة الجمد السرمدي، لذلك تصبح الطبقة السطحية مشبعة بالمياه، مما يساعدها على التحرك من فوق المنحدرات باتجاه الأودية. ويمكن أن تحدث هذه الظاهرة على سطوح لا يزيد انحدارها على درجتين إلى ثلاث درجات. تكون عادة حركة المواد بطيئة جداً لا تتجاوز بضعة سنتمترات في السنة. ومع ذلك يمكن رصدها وقياس سرعتها بقياسات حقلية خاصة تجري على عدة فصول من السنة. أما أشكالها الخارجية فيمكن تمييزها بسهولة من هيئاتها السطحية التموجية التي يزداد تجعدها أحياناً بشكل يجعل أجزاؤها المطوية تتراكب فوق بعضها بعض. وتحمل الترب المنزلقة معها الغطاء النباتي الموجود فوقها، وتأخذ مظهر السجادة المجعدة إذا كان هذا الغطاء عشبياً.

**ب - الزحف creep**: تتمثل عملية الزحف في الحركة البطيئة جداً على السطوح قليلة الانحدار. وتشمل هذه العملية كلاً من زحف التربة والحطام الصخري والصخور. وإن زحف التربه هو من أكثر الانواع انتشاراً، التي تتميز بحدوث تشوهات وازاحة في سياجات المزارع وفي أعمدة الكهرباء والهاتف وثني جذوع الأشجار. وتبدي عادة الطبقات الصخرية المتكشفة انحداراً شديداً في اتجاه مسار الزحف (شكل ٢-١١).



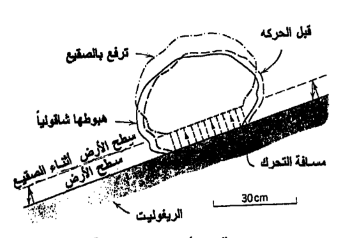
**شكل (٢-١١) تأثير زحف التربة في الهيئات السطحية والمهد الصخري.**

وتساهم في عملية الزحف عوامل كثيرة أهمها مرتبة في الجدول التالي:

| | |
|---|---|
| الرفع الصقيعي | التجلد والذوبان يؤديان إلى رفع وهبوط الحبات (عدم تشبع التربة بالماء). |
| التبريد والتسخين | يسببان تغيرات في حجم الحبات |
| نمو وتفسخ النباتات | عملية الحفر الناتجة عن نمو جذور النباتات، وكذلك الفجوات المتشكلة من تفسخها تساهم في التحرك إلى أسفل المنحدرات. |
| نشاط الحيوانات | تؤدي الحشرات والديدان والحيوانات الحفارة إلى تحرك التربة. |
| الانحلال | يساهم انحلال الفلزات في زحف التربة. |
| نشاط الثلوج | يتم في المناطق التي تمر فيها مواسم ثلجية. حيث يميل الغطاء الثلجي في المنحدرات إلى الانزلاق نحو الأسفل محركاً معه التربة. |

**جدول (١) أهم العوامل التي تساهم في زحف التربة.**

يعد فعل الصقيع من أهم العوامل التي تساهم في عملية الزحف في المناطق الباردة، التي تتكرر فيها عمليات التجمد والذوبان. ففي الشتاء تتجمد المياه التي تملأ الفراغات بين الحبات وتؤدي إلى تمددات حجمية تدفع سطح الأرض في اتجاه عمودي على سطح المنحدر. وفي الربيع، عندما تذوب الأتربة المتجمدة، تحدث تحركات عكسية. فإذا افترض أننا نلاحظ حبة من التربة تلامس سطح المنحدر فهي ترتفع مبتعدة عن السطح أثناء التجمد، وتتحرر وتسقط عند الذوبان مشدودة شاقولياً بالثقالة الأرضية، مما يؤدي إلى تحركها لمسافة قصيرة نحو اسفل المنحدر (شكل ٢-١١) ويؤدي تكرار هذه العملية عدة مرات خلال فترات طويلة إلى الزحف.




**شكل (٢-١٢): يوضح زحف حبيبات التربة نحو أسفل المنحدر نتيجة تناوب التجمد والذوبان. وتشير الأسهم إلى المسافة التي انتقلتها.**

لقد تبين نتيجة قياسات دقيقة لزحف التربة أن سرعة الزحف تتغير حسب شدة الانحدار. فقد قدرت سرعة التحرك في بعض منحدرات الكولورادو بما لا يزيد على ١,٥مم/سنه فوق انحدار ١٩° درجة و ٩,٥مم/سنه فوق انحدار ٣٩°. ويوفر المناخ الرطب شروطاً مناسبة للزحف، كما يعيق الغطاء النباتي الكثيف حدوثه. وقد تعمل جذور النباتات على تثبيت الفتات الصخري وإيقاف الزحف، ومثال على ذلك في بعض الهضاب العشبية في إنكلترا حيث قدر معدل الزحف نحو ٠,٠٢مم/سنة على انحدار ٣٣° درجة.

## الانخسافات subsidence

إن حالات تبدد الكتل السابقة تشمل جميعها حركات أفقية بالإضافة إلى الحركات الشاقولية، أما في حالة الإنخسافات فهي نقل كتل ضخمه من الصخور أو الأراضي في اتجاه شاقولي فقط، وهي ترافق عادة العمليات المنجمية واستخراج المعادن من باطن الأرض. أما الأسباب الطبيعية التي تؤدي إلى تشكل الإنخساف فهي:

١- وجود صخور قابلة للانحلال مثل الصخور الكلسية والملحية.

٢- كثرة الشقوق والفواصل في الصخور.

٣ـ رص المواد الناتج عن ازدياد الثقل على صخور طرية أو غير متماسكة.
٤ـ تراكم طبقات سميكة من الرسوبات أو من الجليديات.
كما تؤدي الهزات الأرضية والانفجارات إلى أحداث مماثلة.

## رسوبات تبدد الكتل

**أ ـ الكوللوفيوم Colluvium**: وهي رسوبات مفككة، عديمة الفرز، ذات حجوم مختلفة، تميل أطراف حبيباتها إلى الأشكال الزاويّة، توجد في قاعدة المنحدرات وتتحرك غالباً بالزحف. وهذه الصفات تُميزها عن الرسوبات التي تنقل بالأوساط المائية أو الهوائية، التي تكتسب أطراف حبيباتها شيئاً من التدورة وتكون مفروزة وتتوضع بشكل طبقات.

**ب ـ الصخور الانزلاقية والتالوس slide rocks & taluse**: توجد هذه الرسوبات في قاعدة الجروف الصخرية في المناطق التي تنشط فيها عمليات الحت الميكانيكي، وتكون على شكل تراكمات من الأنقاض الصخرية تغطي الأجزاء السفلية للجروف. وتتصف قطعها الصخرية وحبيباتها بأنها زاويّة، وتتراوح في مقاييسها ما بين الجلاميد الضخمة إلى الحبيبات الرملية تعرف عادة بالتالوس (شكل٢ـ١٣)، وتسمى الرسوبات المؤلفة للتالوس بالصخور الانزلاقية.



شكل (١٣.٢) التالوس عند قاعدة الجرف. الجلاميد الكبيرة قد تدحرجت وأحاطت بمقدمته.

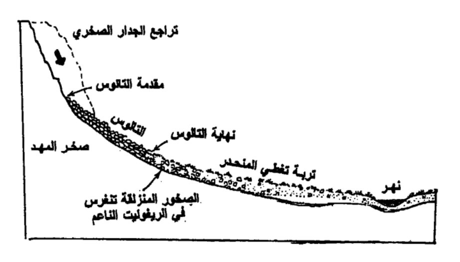
إن انتقال المواد المؤلفة للتالوس من أماكنها الأصلية فيتم بالتساقط أو بالانزلاق أو بالدحرجة، وتشكل عادة سطوحاً شديدة الانحدار (شكل ٢ـ١٤) وتميل المواد الناعمة فيها إلى الاستقرار في الفراغات المتوافرة بين القطع الصخرية الخشنة. وبما أن القطع الصخرية الخشنة تتسارع في تحركها أكثر من الناعمة فهي تسبقها ويكون تجمعها الأعظمي في أسفل المنحدر. ويمكن للقطع الكبيرة أن تتدحرج أكثر لتشكل طوقاً حول نهاية التراكم (الشكل ٢-١٣). أما معدل ازدياد التراكم فيعود إلى شدة التجوية التي تتبع بدورها إلى المناخ.



**شكل (٢-١٤): تالوس في قاعدة الجرف الصخري مؤلف من صخور منزلقة ضخمة.**

وهو في حالة توازن (المواد الساقطة من أعلى الجرف تساوي تقريباً المواد التي تتحرك إلى أسفل المنحدر). حيث ميل المنحدر نحو (٤٠°) درجة وهي زاوية السكون للقطع الكبيرة وزاوية الأطراف. وفي هذه الحالة تتوازن قوة الثقالة مع القوى الأخرى وبخاصة قوة الاحتكاك.

ومع استمرار إضافة مواد جديدة إلى مقدمة التـالوس تتحـرك المـواد الواقعـة في نهايته نحو اسفل المنحدر. ويكون زحف هذه المواد بطيئاً جداً لدرجة يكون الوقـت كافياً لتتحوى كيميائياً. وهكذا تتحول الصخور الانزلاقية الخشنة تدريجياً إلى مـواد ناعمة قابلة لحمل كميات كبيرة من الرطوبة في فراغاتها المسامية الصغيرة مما يساعد علـى الزحـف والوصـول إلى الوديـان حيـث تغــذي المجـاري المائيـة بالرســوبات (شكل٢-١٥).




**شكل (٢-١٥): يشكل التالوس حلقة وصل بين المهد الصخـري فـي أعلـى المنحدر والريغوليت النـاعم فـي أسفل المنحدر.**

## إثارة أحداث تبدد الكتل Triggering of mass - wasting

تظهر عمليات تبدد الكتل للوهلـة الأولى بأنهـا تحـدث بشـكل عشـوائي إلا أن تواتر حدوثها وشدة أخطار بعضها ينسب إلى نشاطات غير عادية أهمها:

**أ ـ الصدمات المفاجئة sudden shocks:** يؤدي حدوث صدمات مفاجئة مثـل الهزات الأرضية إلى تحرير الكثير من الطاقة التي تجعل التراكمات الصخريـة والفتاتيـة الموجودة على سطوح المنحدرات بحالة عدم تـوازن. ففـي عـام ١٩٢٩ أدى وقـوع هزة أرضية شديده بدرجة ٧,٧ (بمقياس ريختر) في شمال غرب أيسـلندا الجنوبيـة إلى

حدوث ١٨٥٠ انزلاقاً أرضياً في منطقة لا تزيد مساحتها على ١٢٠٠كم٢، حيث كان مركز الهزة قريباً منها. وقد قدرت كمية المواد المنزلقة بنحو ٢١٠,٠٠٠م٣ من الأنقاض الصخرية لكل كيلو متر مربع من اليابسة. ويمكن أن تحدث انزلاقات الأراضي بسبب تعديل الانحدار أو بإزالة قاعدتها الداعمة عند شق الطرقات أو بتسوية منحدرات اصطناعية تزيد على زاوية الاستقرار. ومن الممكن تلافي حدوث الانزلاقات بإنشاء الجدران الاستنادية الداعمة. ومع ذلك يمكن أن تتغلب ضغوط انزلاق الريغوليت على متانة هذه الجدران وتجعلها عديمة الفائدة.

أما عمليات هبوط الأراضي وغيرها من الانزلاقات فيمكن إثارة نشاطها بنتيجة قطع قاعدتها بالفعل الحتي لبعض المجاري المائية، أو بفعل الأمواج الشاطئية. ويكثر حدوث الانزلاقات في المنحدرات الشاطئية أثناء حدوث العواصف الشديدة التي توجه الأمواج البحرية القوية لتضرب في اليابسة وتحفر في الصخور الشاطئية وتحطمها، وبخاصة في الصخور الطرية الواقعة في أسفل بعض الجروف.

أما العامل الرئيس الذي ينشط مختلف الانزلاقات فهو توفر الأمطار الغزيرة والثلوج التي تمتد لفترات طويلة، وتجعل الريغوليت شديد التشرب بالماء.

**ب ـ الاندفاعات البركانية volcanic eruption**: وهي عامل مهم من عوامل إثارة وتنشيط الانزلاقات الأرضية. فالبراكين الانفجارية التي تندفع منها القطع الصخرية والفتات الصخري الخشن والناعم، تشكل أكواماً هائلة من الفتات الناري، يمكن لبعضها أن يستقر على سطوح منحدرة بزوايا قد تكون مناسبة للاستقرار، قد يزول استقرارها أثناء النشاط البركاني، كما يمكن أن تسهل تحركها هطول الأمطار الغزيرة أو ذوبان الثلوج التي تؤدي إلى تحرير كميات كبيرة من الماء، مما يجعلها تنزلق بسهولة وبسرعة وتشكل اللاهارات.

وأخيراً يجب أن نذكر أن تزايد عدد السكان وعمليات البناء وشق الطرقات تساهم أيضاً في حدوث الانزلاقات الأرضية، وبالتالي حدوث كوارث وخسارات بالأرواح والممتلكات.

# الفصل الثالث

# المياه الجارية السطحية

إن للمياه الجارية تأثيراً كبيراً في حياتنا اليومية، وحضارتنا الإنسانية، فهي العصب الحيوي على وجه الأرض، ومن أهم العوامل التي تؤثر في سطح الأرض، فهي تَحتُّ مجراها في الصخور ناقلة المفتتات إلى البحيرات والمحيطات حيث تترسب فيها، وهي العامل الرئيسي في نقل المواد الناتجة عن التجوية وتبدد الكتل. وإن معظم الأشكال التضاريسية التي نراها حولنا، ما هي إلا نتيجة العمل المشترك للتجوية وتبدد الكتل والأنهار.

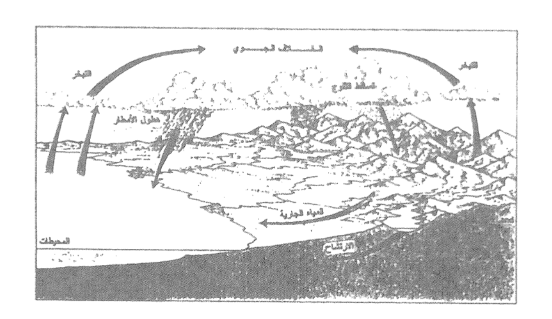
## الدورة المائية في الطبيعة: المياه على اليابسة

تحتوي اليابسة ما يقرب ٢,٥٪ من مجمل مياه الأرض. ونحو نصف هذه المياه يكون بحالة صلبة على شكل جليديات وغطاءات جليدية ضخمة في جزيرة غرينلاند وقارة القطب الجنوبي. ويضاف إلى ذلك أن معظم المياه الحرة في اليابسة موجود في باطن الأرض. وتوجد كميات قليلة منها على السطح في البحيرات والمستنقعات وبحيرات السدود والأنهار. ولا تشكل هذه الأخيرة سوى نسبة بسيطة جداً لا تتعدى الواحد بالمليون من المياه الموجودة في العالم.

ماذا يحدث للماء في حال سقوطه على اليابسة؟ تتوزع مياه الأمطار في مجـالات ثلاثة: الأول منها يجري على سطح الأرض ويعرف بالمياه الجارية runoff، والثـاني يتسرب إلى ما تحت السطح، والثالث منها يعود مباشرة إلى الجو بالتبخر. وتستهلك النباتات جزءاً كبيراً من مياه الأمطار في جذورها وسوقها وأوراقها، كمـا تعيـد إلى الجو جزءاً كبيراً من المياه التي تستهلكها بعمليـة النتـح transpiration. ففـي هـذه العملية تعطي النباتات كميـة لا يستهان بهـا مـن بخـار المـاء إلى الجـو. فقـد بينـت الدراسات أن حقلاً من المزروعات ينتج سنوياً كمية من الماء تكفي لتغطية مسـاحته الكلية بسماكة (٦٠) سنتمتراً، بينما تعطي الغابات ضعـف هـذه الكميـة إلى الجـو. وبما أنه من الصعب التمييز بين كميات المياه الناتجة من التبخر عن تلـك الناتجـة مـن النتح، فيستعمل مصطلح موحد وهو التبخر النتحي evapotranspiration للتعبـير عن تأثيرهما المشترك.

أما الماء المتبخر من البحار والمحيطات واليابسة، فيعود منه نحو ٢٥٪ إلى اليابسـة على شكل أمطار وثلوج أحياناً، وتفوق الميـاه الـتي تهطـل علـى اليابسـة الميـاه الـتي تتبخر منها نحو ٧٩٪. أما الكميات التي تهطل في البحـار والمحيطـات فهـي عمومـاً أقل من المياه المتبخرة منها. ويعدل عدم التوازن هذا ما ينقل من مياه اليابسة بشكل مباشر إلى البحر بالأنهار والمجاري المائية المختلفة وينابيع الميـاه الجوفيـة تحـت البحـر (شكل ٣-١). وتختلف معدلات الأمطار من مكـان لآخـر، كمـا تختلـف معـدلات المياه الجارية على السطح أو المتسربة في باطن الأرض.

تشمل المياه الجارية المياه الـتي تجـري بشـكل حـرٍ علـى سـطح اليابسـة دون أن تكون محددة بأقنية (مياه الجريان)، والمياه التي تجري في أقنية الأنهار والمجاري المائيـة. وهي تقوم بدور فعال في تشكيل سطح الأرض بالمقارنة مع العوامل الأخرى، لأنهـا تؤثر في جميع المناطق تقريباً حتى في المناطق الجافة.




**شكل (٣-١): الدورة المائية.**

## مياه الجريان:

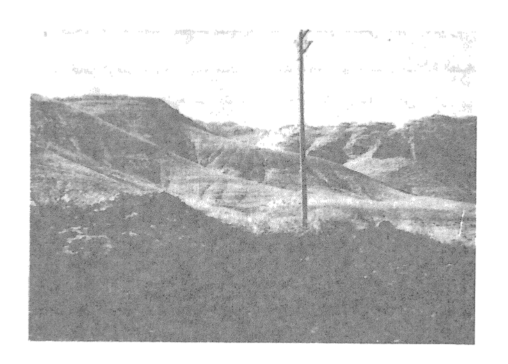
الجريان هو عمل المياه التي تجري بحرية في شبكات مائية متفرقة على سطوح الأراضي المنحدرة، وسرعان ما تتمركز في مجارٍ أو أخاديد، وتنتهي هذه بالتجمع في نهر ما. يوجد إذن انتقال تدريجي من جريان الماء المتفرق إلى التخدد فالحت بوساطة الأنهار.

وقد يحدث إثر هطول أمطار غزيرة على سطح منتظم ضعيف الانحدار، أن يشكل الماء طبقة متصلة. إلا أنه لا يلبث أن ينحصر في شبكات. فإذا كانت التربة عارية فإن موادها الناعمة جداً هي التي تجرف أول الأمر. والأثلام المحفورة على هذا النحو تطمرها المفتتات بين فترات تساقط المطر. وعند هطول الأمطار الغزيرة من جديد، تأخذ الشبكات المائية مسارات تختلف عن المسارات السابقة. فشبكة الخطوط المائية تنتقل باستمرار، وتقوم في النهاية بتنظيف السطوح كافة. أما عندما

تكون التربة مغطاة بالنباتات، فإن الجذور النباتية تُبطّئ وتعيق عملية التنظيف، في حين تزداد نسبة المياه المتسربة.

ويسبب جريان الماء حت المنحدرات والسفوح الجبلية وتجميع الأنقاض في أسفلها، فهو يؤدي إلى تخفيف الانحدار الوسطي فيها.

أما التخدد فيعقب جريان الماء المتفرق في الأقسام المنخفضة في المنحدرات، وقد يحدث التخدد وحده عندما تكون التربة متجانسة، وغير نفوذة، وذات حبات ناعمة، ومعرضة لأمطار غزيرة (شكل ٣-٢).



**شكل (٣ - ٢): مظاهر التخدد في صخور الايوسين الأدنى الكلسية (دمر).**

تتعلق أفعال جريان الماء بالعوامل التالية:

١ـ كمية المياه الجارية على سطح الأراضي. وهذه الكمية مرتبطة بدورها بمقدار التهطال من جهة، وبقدرة التربة والنباتات التي تغطيها على امتصاص الماء من جهة أخرى.

٢ـ سرعة جريان الماء التي تزداد مع شدة الانحدار، وتنقص بوجود غطاء نباتي كثيف.

٣ـ تركيب التربة، إذ إن العناصر الناعمة تجرف بسهولة أكبر من العناصر الخشنة.

تؤثر طبيعة الأراضي في جريان الماء من حيث درجة نفوذيتها، ومن حيث حبات صخورها. فالغضار يتخدد بسهولة، بينما يتخدد الكلس النفوذ بصورة أقل.

أما الحجر الرملي والرمل فيمارسان تأثيراً متوسطاً يتغير حسب صلابة الصخر. وتتكون في الأراضي غير المتجانسة أشكال متنوعة جداً من التضاريس.

## الأنهار والمجاري المائية

لقد رأينا فيما سبق أن مياه الأمطار حين تجري على سطوح مستوية منحدرة تفرش هذه السطوح ويسمى ذلك غسل المنحدرات **slope wash**. ولا تلبث هذه المياه المنحدرة على السطح أن تتجمع في مجارٍ مائية صغيرة، تتلاقى بدورها في جداول أكبر وهكذا حتى يتشكل مجرى رئيس. وتعرف المجاري المائية الدائمة **perennial** بالأنهار **rivers**. أما الروافد الصغيرة التي لا تجري فيها المياه إلا إثر هطول الأمطار فهي مؤقتة **ephemeral**، ومن الممكن أن تتدفق المياه في مجرى مائيٍ مستمر على امتداد الموسم الرطب، وبخاصة حين يكون منسوب الماء الجوفي قريباً من سطح الأرض، بحيث يغذي هذا المجرى، وتنضب مياهه خلال موسم الجفاف فهي مجارٍ متقطعة **intermittent** أو موسمية.

فالنهر الرئيس له عدة روافد **tributaries** أصغر، وهي بدورها لها أيضاً روافد أصغر فأصغر حتى المجاري الصغيرة المؤقتة، وجميعها تشكل ما يسمى نظام

التصريف drainage system، كما تدعى المنطقة التي تحتويها حوض التصريف drainage basin. وتسمى أحواض التصريف الصغيرة مستجمع الأمطار watersheds. ويفصل عادة بين أحواض التصريف المتجاورة تضاريس مرتفعة أو سلاسل جبلية تدعى القواسم divides. كما يدعى الجزء الفاصل بين مجريين مائيين متجاورين بالقاسم أيضاً. ويمثل عادة في الخرائط بخط وهمي يمر بأعلى أجزاء المنطقة بحيث تفصل بين رؤوس الروافد العليا لكل نهر من الأنهار عن رؤوس الروافد العليا للأنهار الأخرى التي تنبع من المنطقة نفسها (شكل ٣-٣). ومن المفيد جداً وضع خرائط لأحواض التصريف بحيث تساعد على دراسة المصادر المائية ورصد الفيضانات.




**شكل (٣-٣): قاسم رئيس جبلي يفصل بين أحواض التصريف، وقواسم أصغر تفصل بين المجاري المائية المتجاورة.**

## أنماط التصريف النهري Drainage patterns

يقصد بنمط التصريف النهري الصورة والنظام العام الذي يبدو عليه كل نهر بروافده الرئيسة والثانوية. إذ إننا نلاحظ أن خطوط التصريف المائي تظهر مرتبطة ببعضها بعضاً في أشكال خاصة، بحيث تعكس بوضوح بعض العوامل التي تحكمت

فيها، وجعلتها تتخذ هذه الأشكال أو الأنماط. ومن هذه العوامل نذكر:

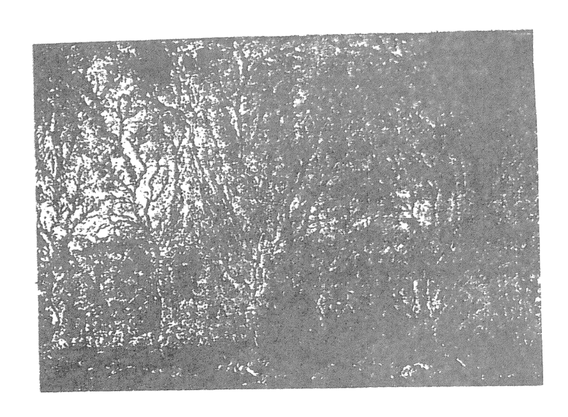
١ـ طبيعة الانحدار.

٢ـ ترتيب الوحدات الصخرية واختلاف التركيب الصخري.

٣ـ البنية الجيولوجية.

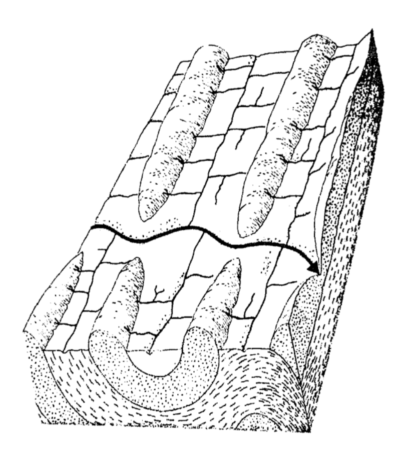
٤ـ الحركات التكتونية المؤثرة في تعديل نظام الصرف.

**آـ التصريف النهري الداندريتي Dendritic drainage**: يتكون عادة في المناطق ذات الصخور المتجانسة التي تتجاوب مع عمليات الحت والتعرية تجاوباً متماثلاً في جميع الاتجاهات. وتلتقي الروافد بالنهر الرئيس بزوايا حادة، وكلما كوّن النهر لنفسه رافداً واضح المعالم، اتصلت بالتالي بهذا الرافد روافد ثانوية إلى أن يتكون نظام نهري أشبه بتغصنات الشجرة (شكل ٣ـ٤).



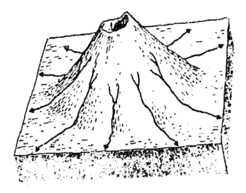
**شكل (٣ـ٤): صورة جوية للنمط الداندريتي.**

**ب ـ التصريف النهري العريشي Trellis drainage**: يتطور هذا النمط على أراضٍ ذات صخور أصابها الطي، بحيث تتجاور على السطح صخور قاسية وصخور طرية، مما يؤدي إلى حصر الجريان المائي في أماكن الصخور الطرية وإلى ترابط المجاري المائية الفرعية مع الرئيسة بزوايا شبه قائمة تعطي شكل شبكة عريشية (شكل ٣ـ٥).



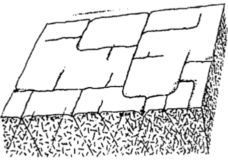
**شكل (٣ـ٥): النمط العريشي.**

**حـ ـ التصريف النهري الشعاعي Radial drainage**: تأخذ فيه المجاري المائية اتجاهاتها كنتيجة طبيعية للانحدار. بحيث تتفرع خارجياً في جميع الاتجاهات من منطقة مركزية عالية. وهذا النمط يميل إلى التطور على منحدرات البراكين المتشكلة حديثاً (شكل ٣ـ٦).



**شكل (٣-٦): النمط الشعاعي.**

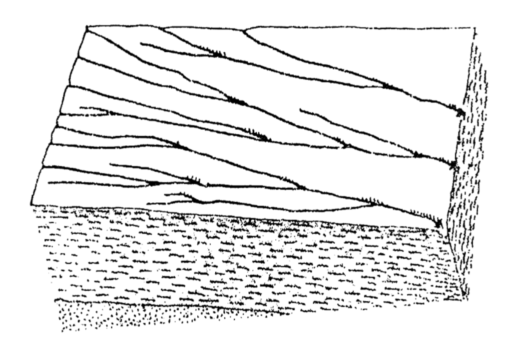
**د - التصريف النهري المستطيل أو المتعامد Rectangular drainage:** يتطور هذا النمط على الصخور النارية المشققة، حيث ينحني فيه النهر الرئيس انحناءات واضحة بزوايا قائمة، كما تلتقي الروافد بالنهر الرئيس بزوايا قائمة، مما يدل على مدى تأثر النهر وروافده بالفواصل والانكسارات الموجودة في الصخور النارية (شكل٣-٧).



**شكل (٣-٧): النمط المتعامد.**

**هـ - التصريف النهري المتوازي Parallel drainage:** ينتشر هذا النمط بكثرة في المنحدرات شديدة الميل ذات التركيب الصخري المتجانس، وبخاصة

الصخور المؤلفة من حبيبات ناعمة كالغضاريات. ويكون فيه النهـر الرئيـس وروافـده تقريباً شبه متوازية (شكل ٣ـ٨).



شكل (٣ـ٨): النمط المتوازي.

تعطي أهمية خاصة لأحواض التصريف التي تتألف منطقتهـا مـن صخـور كلسـية ذات حت كارستي. حيث تحفر المياه الجارية والمتغلغلة فيها ما يسمى الحفر الغـائرة أو البالوعات sinkholes. وأيضاً تشكل المغاور تحت السطح بحيث يسهل تسرب الميـاه السطحية إلى باطن الأرض، ويؤدي إلى تلاشي الكثير من الأنهار و المجاري المائية. ولا يبقى منها سوى بعض المجاري الغزيرة غير المترابطة.

## تدفق الأنهار Flow of rivers

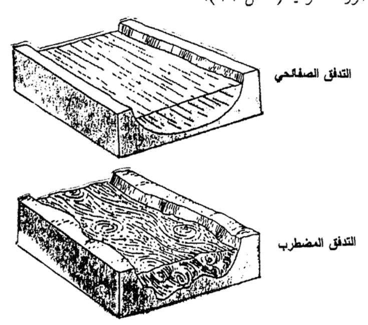
تحوي مياه الأنهار طاقة حركية كبيرة، تؤدي إلى تأثير جيولوجي مهم في المناطق التي تجري فيها. وتنشأ هذه الطاقة من اندفاعها بعامل الثقالة الأرضية إلى المستويات الأدنى، وتعرف بالطاقة الكامنة $E = m.g.h$، التي تتحول إلى طاقة حركية:

$E = \frac{1}{2} m.v2$. إذن يكون $E = m.g.h = \frac{1}{2} m.v2$، وهكذا فإن جريان الماء في القناة النهرية يعتمد على الطاقة المتوافرة فيه، وهي ترتبط بشكل رئيس بسرعة المجرى المائي، التي لها علاقة بالانحدار وشكل القناة النهرية وحجمها، وكمية المياه المتدفقة فيها.

يجري الماء في الأنهار بإحدى طريقتين:

١ـ تدفق صفائحي Laminar flow حيث تتحرك جزئيات الماء molecules في مسارات مستقيمة.

٢ـ تدفق مضطرب Turbulent flow حيث تتحرك جزئيات الماء في اتجاهات مختلفه وبصورة عشوائية (شكل ٣ـ٩).




شكل (٩.٣): التدفق الصفائحي والتدفق المضطرب.

حين تكون سرعة التيار المائي منخفضة، والقناة النهرية ملساء وخالية من العقبات، فإن الماء يتحرك بتدفق صفائحي. وبالمقابل حين تكون كمية المياه المتدفقة كبيرة، وتكثر العوائق في مجراه وجوانبه، فإن احتكاك الماء يزيل التدفق الصفائحي، وتصبح حركة تدفقه سريعة ومضطربة. وعادة يكون تدفق المياه في المناطق السهلية تدفقاً صفائحياً في أكثر الأوقات. أما في أيام الفيضانات فإن التدفق يصبح مضطرباً، بسبب زيادة كمية المياه والمواد الرسوبية في القناة النهرية.

## العوامل المتحكمة في سرعة تدفق مياه الأنهار

تؤثر في سرعة تدفق مياه الأنهار عوامل مختلفة يمكن ايجازها بما يلي:

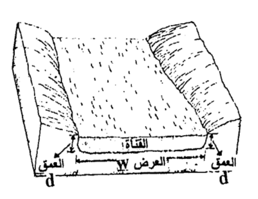
١ـ انحدار القناة النهرية.

٢ـ شكل القناة النهرية.

٣ـ كمية المياه في القناة النهرية.

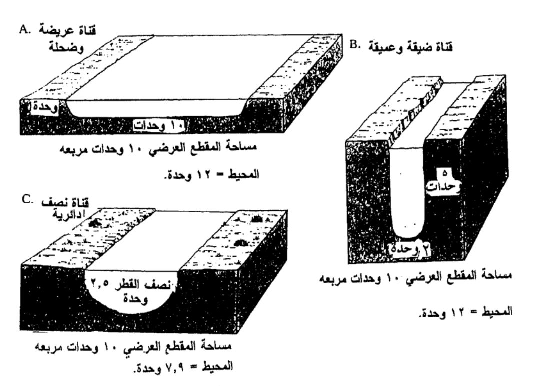
**١ـ انحدار القناة النهرية:** إن انحدار القناة النهرية له تأثير كبير في سرعة جريان المياه، ويعرف بمقدار الانخفاض الشاقولي بالنسبة إلى مسافة ثابتة. فكلما كان الانحدار شديداً كانت السرعة أكبر. وبصورة عامة تكون الأقنية النهرية شديدة الانحدار بالاقتراب من عاليتها، وذات انحدار خفيف بالقرب من سافلتها. لذلك تنخفض سرعة التيارات المائية حين تهبط المياه من أماكن جبلية إلى أماكن سهلية.

**٢ـ شكل القناة النهرية:** إن شكل المقطع العرضي للقناة النهرية يؤثر في سرعة المياه المتدفقة. حيث يتم احتكاك بين جزئيات المياه وقاع وجوانب القناة. وإن مجموع طول الجوانب وعرض القناة يُعرف بالمحيط المبلل **wetted perimeter** ويرمز له بـ(WP) (شكل ٣ـ١٠).




شكل (٣-١٠) المحيط المبلل للقناة النهرية: WP = d + w + d

فكلما ازداد محيط المقطع المبلل زاد الاحتكاك وقلت سرعة الماء. فعندما يكون المقطع العرضي للقناة النهرية نصف دائري، يكون لها حد أدنى من الاحتكاك (شكل٣-١١).




شكل ٣-١١: تأثير شكل القناة في سرعة التيار.

بالرغم من أن مساحة المقاطع العرضية للأقنية الثلاث واحدة، إلا أن سرعة التيار في القناة نصف الدائرية تكون أكبر لأن لها محيطاً مبللاً أقل.

كما هو واضح في الشكل إذا تساوت مساحة المقطع العرضي، وجميع العوامل الأخرى للقناة النهرية، فإن شكلها يؤثر في سرعة المياه فيها.

كذلك تختلف سرعة المياه المتدفقة في المكان الواحد من القناة النهرية باختلاف العمق، فهي تتناقص تدريجياً مع العمق، وتكون السرعة القصوى في منتصفه تحت السطح بقليل، لأن المياه تتحرك بحرية بعيدة عن الاحتكاك بالجوانب والقاع، هذا إذا كانت القناة النهرية مستقيمة، أما إذا كانت متعرجة فالسرعة تختلف من مكان لآخر على طول القناة.

**٣ـ كمية المياه في القناة النهرية:** تأخذ معرفة كمية المياه في القناة النهرية أهمية كبرى في دراسة مختلف المظاهر النهرية، بما فيها الحت والتعرية، وحركة الرسوبات والإمداد المائي، وتحليل أخطار الفيضانات ورصد حدوثها. وتعرف كمية المياه المتدفقة عند نقطة معينة من النهر خلال وقت معين بالتدفق النهري أو التصريف النهري discharge. وهو يختلف باختلاف الأوقات وعلى طول القناة النهرية. ويحسب بضرب مساحة المقطع العرضي في سرعة الماء، ويقاس عادة بالأمتار المكعبة في الثانية. وأما مساحة المقطع العرضي فيساوي عرض القناة (بالأمتار) × عمق القناة (بالأمتار). ويعبر عن ذلك بالمعادلة التالية:

$$Q = w \times d \times v$$

التصريف م³/ثا     العرض م     العمق م     السرعة م/ثا

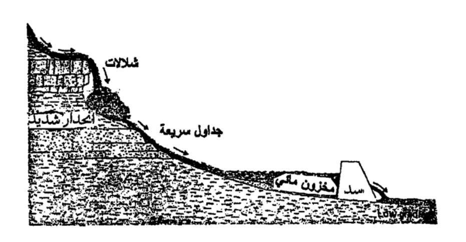
يتغير العمق باستمرار عبر النهر، وكذلك تختلف السرعة في كل نقطة من المقطع العرضي. ولهذا يكون من الصعب تقدير هذه القيم بدقة متناهية ويعبر عنها بمعادلات وسطية.

إن حجم المقطع العرضي لأي مكان من القناة النهرية يعكس الشروط المسيطرة في ذلك المكان. ومع ذلك لا يكون كبيراً لدرجة كافية لاستيعاب كميات كبيرة من المياه عند هطول أمطار غزيرة. وفي هذه الحالة تفيض المياه على جوانب النهر، وتنتشر على الأراضي المتاخمة مشكلة السهول الفيضية floodplains.

## البروفيل الطولي للقناة النهرية Longitudinal profile

البروفيل الطولي للنهر هو الخط الذي يرسم على طول سطح النهر من المنبع حتى المصب (شكل ٣-١٢). ففي المرحلة الأولى من حياة النهر يتفق هذا الخط مع الإنحدار الأول لسطح الأرض، ويساير الخط الأفقي عند مصب النهر. يطلق على هذا الخط بروفيل التوازن.

فإذا كانت عملية الحت واحدة في أجزاء النهر المختلفة، بقي النهر محافظاً على إنحداره الأول، دون أن يتغير بروفيله الطولي. إلا أن عملية الحت تختلف من مكان لآخر على طول مجراه. ففي سافلة النهر يهبط سطح الأرض إلى مستوى قريب من سطح البحر، ويضعف الحت الشاقولي وينشط الترسيب، وبالمقابل تكون عملية الحت في عالية النهر نشطة إلى حد ما مع أن الروافد التي تغذي النهر تكون قليلة. أما في الأجزاء الوسطى من مجرى النهر فيكون الحت أعظم ما يمكن. لذلك يأخذ بروفيل التوازن شكل قوس مقعر، مع العلم أن هذا البروفيل لا يمثل تماماً التوازن الحقيقي للمجرى المائي نظراً لتغيرات سرعة الماء والصبيب، وعدم انتظام وتجانس الطبقات الصخرية التي يمر فوقها النهر.



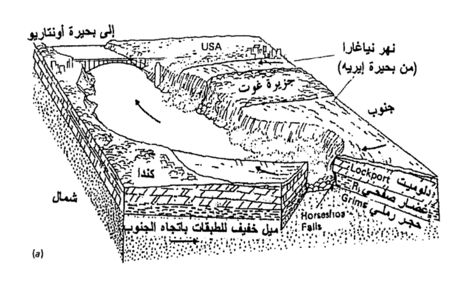

**شكل ٣-١٢: البروفيل الطولي للقناة النهرية.**

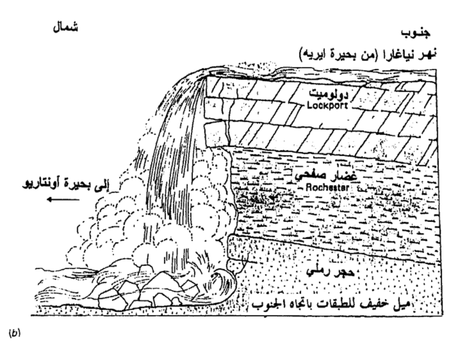
تتشكل الشلالات في عالية النهر، لإنحدار مياه النهر من حافة الصخور الصلبة على الصخور اللينة. تشير الأسهم إلى اتجاه التيار المائي.

يتحكم في انحدار المجرى النهري طبيعة التضاريس وأنواع الصخور التي يمر فيها، وينحصر وجود الشلالات أو المساقط المائية waterfalls والجداول السريعة rapids في عالية النهر، حيث تكون الانحدارات شديدة، ويكثر وجود الصخور القاسية.

إن من أهم المظاهر التي توجد أحياناً في مجرى الأنهار هي الشلالات، ويعود تشكلها إلى انخفاض مفاجئ في مكان ما من مسار النهر الطولي. وهذا يكون في حالة حدوث الفوالق التي تؤدي إلى تشكل جروف صخرية على امتدادها، أو عندما تجري الأنهار على منحدرات مؤلفة من صخور متفاوتة في مقاومتها للحت. وفي مثل هذه الحالة تشكلت شلالات نياغارا في مجرى نهر سانت لورانس في جزئه الممتد بين بحيرتي إيريه Erie وأونتاريو Ontario (نهر نياغارا) إذ تتألف الطبقات الصخرية العليا من صخور دولوميتية قاسية ترتكز فوق طبقات من الغضار الصفحي والحجر الرملي (شكل ٣-١٣).

تفرش مياه نهر نياغارا فوق صخور الدولوميت، وتهبط من حافتها شاهقة الارتفاع على الصخور اللينة، وتشكل دوامات مائية شديدة في القاع، التي تعمل على حت الطبقات الصخرية اللينة وتعميق القاع. وبصورة تدريجية تُفرغ تحت الدولوميت وتؤدي إلى انهياره، وبهذا تتراجع شلالات نياغارا باتجاه المنبع. وقد قدر تراجعها منذ تشكلها نحو ١١كم. ولا بد أن تستمر عملية تراجع هذه الشلالات حتى تنصرف مياه بحيرة إيريه إلى بحيرة أونتاريو الأقل منها منسوباً.



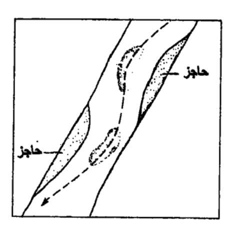

شكل ٣-١٣: a - شلالات نياغارا: الشلالات الأمريكية والشلالات الكندية يفصلهما جزيرة كوت Goat.

b - مقطع في الشلالات الكندية Horseshoe يوضح الطبقات الصخرية وعمل المياه في تراجع الشلالات.

ومع استمرار اهتراء اليابسة وتهدمها تزول الاختلافات التضاريسية المؤدية إلى تشكل الشلالات، حيث تحل محلها جداول مائية سريعة. وهنا لا بد من القول إن وجود الجداول السريعة في مكان ما، يعني أنها كانت في سابق عهدها شلالات، فقد تنشأ من تدفق مياه الأنهار فوق صخور معترضة مقاومة في مناطق شديدة الانحدار.

## نماذج الأقنية النهرية Channel patterns

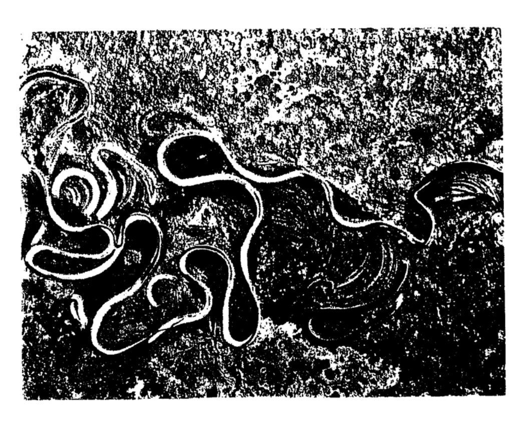
**أ ـ الأقنية المستقيمة Straight channels**: عندما ننظر إلى المجاري النهرية من الجو، نجد أن معظمها يتبع مسارات ملتوية، ما عدا الأماكن المتأثرة بالفوالق والفواصل، حيث تكون فيها المسارات مستقيمة ولمسافات محدودة. وقد أظهرت دراسات الأجزاء المستقيمة من الأقنية النهرية أن التيار المائي يبدي تأرجحات جانبية، ويُظهر ذلك الخط الواصل بين أعمق الأجزاء في القناة النهرية (شكل ٣ـ١٤). ومع تأرجح التيار نحو أحد الجانبين، تتوضع الرسوبات في الجانب المقابل حيث تكون السرعة أقل. ويحدث العكس حين يكون التأرجح إلى الجانب الثاني. وتعرف الرسوبات المتوضعة بالحواجز bars. وهكذا يتناوب توضع الرسوبات الحاجزية على الجانبين، وتكون بداية لتشكل المنعطفات النهرية.




**شكل ٣ـ ١٤: رسم تخطيطي يوضح تموج التيار المائي في القناة النهرية المستقيمة.**

يشير الخط المنقط إلى أعمق أجزاء القناة، والسهم إلى اتجاه التيار المائي.

**ب ـ أقنية المنعطفات Meandering channals**: إن هذا النموذج من الأقنية شائع الانتشار، ويتألف من سلسلة من الالتواءات التي تعرف بالمنعطفات meanders (شكل ٣ـ١٥).

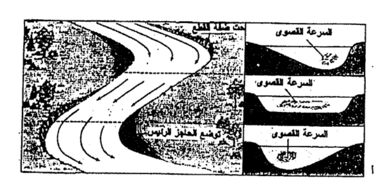


**شكل ٣ـ١٥: صورة جوية للمنعطفات النهرية. تظهر فيها عدد من البحيرات الهلالية المقتطعة من النهر.**

تتشكل أقنية المنعطفات عندما يصل النهر إلى مناطق سهلية. إذ إن المواد الرسوبية المنقولة وحت الجوانب يختلفان حسب سرعة التيار. فمن الطبيعي أن يحفر الماء المتحرك بشكل قوسي قاعدة الجانب الخارجي (المقعر)، ولا تلبث أن تسقط الأجزاء العلوية منه إلى داخل القناة مما يجعله شديد الانحدار، ويعرف هذا الجانب بضفة القطع cut bank. بينما تكون سرعة التيار أقل في الجانب المقابل (المحدب)، فيوضع رسوباته على شكل ألسنة في مجرى النهر تعرف بالحاجز الرئيس point bar.

ويستمر ازدياد انحناء مجرى النهر، وتقترب أطراف المنعطف تاركة معابر ضيقة من

الأرض تعرف برقبة المنعطف meander neck، ولكن سرعان ما تخترق مياه النهر هذه الرقبة في موسم الفيضان وتغلق المنعطف وتسير بخط مستقيم. ثم تكوّن مياه النهر بعد ذلك سداً من الرسوبات يفصل المجرى الجديد عن المجرى المهجور، وقد تتجمع المياه الراكدة في أجزاء من المنعطف المهجور لتشكل بحيرات هلالية الشكل، أو قوسية تشبه طوق الثور Oxbow، تدعى بحيرات طوق الثور (شكل ٣-١٦). إن أهم ما يميز هذه المنعطفات هو زحفها المستمر نحو مصب النهر. ويرجع هذا إلى حت الجوانب المقعرة المواجهة للمصب، بينما يحدث الترسيب عند الجوانب المحدبة التي تواجه المنبع.







شكل ٣-١٦: آ- التحرك الجانبي للمنعطفات النهرية بوساطة حت الضفة الخارجية، وتوضع الرسوبات في الضفة الداخلية. وبذلك يستطيع النهر أن يغيّر مسار قناته.

ب - مراحل تكون بحيرة طوق الثور.

لقد كانت منعطفات نهر الميسيسبي وغيرها من الأنهار الكبيرة موضع دراسات مطولة من قبل الجيولوجيين والمهندسين، تتعلق بمشكلات الفيضانات والملاحة. وتوصلوا منها إلى أن المنعطفات النهرية ليست وليدة الصدفة. إذ إنها تتشكل في الأقنية النهرية ذات الانحدارات الخفيفة، التي تحمل مياهها لحقيات ناعمة الحبيبات. كما وجدوا أنها تتشكل أيضاً في الأنهار التي لا تحمل مياهها مواد رسوبية. ذلك أن التيار المائي بطبيعته يحمل نوعاً من الطاقة الحركية، التي تضيع أو تتحول باستمرار الحركة والاحتكاك. وان الطبيعة تميل نوعاً ما إلى ضياع أو تحول منتظم لهذه الطاقة. بحيث أن ضياع أو تحول الطاقة في أي جزء من أجزاء التيار المائي يكون مساوياً ذلك في الجزء الآخر الذي يساويه. وقد وجد أن هذا الضياع أو التحول المنتظم يمكن تحقيقه بأفضل ما يمكن في المجرى الملتوي للتيار. وعليه فإن نموذج المنعطفات النهرية يعكس الطريقة التي تتدفق فيها الأنهار بأقل مقاومة ممكنة، وتتوزع فيها الطاقة بشكل متجانس ومنتظم على امتداد مجاريها.

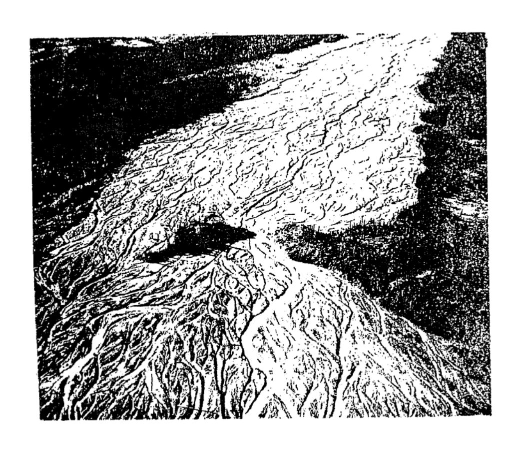
**حـ - الأقنية المضفورة Braided channals**: يتشكل هذا النموذج من الأقنية في سهول الفيضان، ويتصف بأن القناة النهرية تنقسم إلى عدد من الأقنية ثم تلتقي بشكل معقد يشبه إلى حد ما الضفائر. وتكون هذه الأقنية ضحلة ومغطاة بغطاء لحقي رقيق، تفصلها عن بعضها بعضاً حواجز أو جزر رسوبية طولانية (شكل٣-١٧).




شكل ٣-١٧: رسم تخطيطي يوضح تشكل الأقنية المضفورة.

قد يحدث أحياناً في مواسم الفيضان أن يجلب النهر كميات كبيرة من المواد المفتتة، بحيث لا تقوى مياهه على حملها فيرسبها في قاعه على هيئة حواجز أو جزر حصوية رملية، مما تضطر مياه النهر لأن تنقسم إلى مجارٍ متعددة عندما ينخفض منسوبها بعد انتهاء فترة الفيضان.

يتشكل هذا النموذج أيضاً في مجاري الأنهار التي تقع في مناطق جافة، حيث تجلب إليها مياه الأمطار الغزيرة والموقتة كميات كبيرة من الرسوبات. كذلك يحدث أثناء مواسم الدفء في مناطق وجود الجليديات (شكل ٣-١٨).



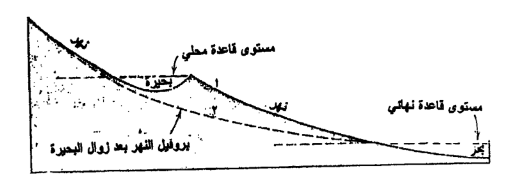
**شكل ٣-١٨: صورة جوية توضح تشكل الأقنية المضفورة قرب نهاية جليدية في حالة الانصهار.**

## مستوى القاعدة Base Level

مستوى القاعدة للنهر هو أدنى مستوى يصل إليه النهر في تعرية واديه. ويعد مستوى سطح البحر مستوى القاعدة النهائي Ultimate base level، حيث يتوقف عنده حت اليابسة. إذ إن مياه أي نهر عندما تصب في البحر تنخفض الطاقة الكامنة إلى الصفر، وتصبح عندها غير قادرة على القيام بأي عمل من أعمال النقل والحت. ما عدا الأنهار التي تصب في أحواض داخلية مغلقة ليس لها نهر مصرف إلى البحر، ويكون فيها القاع غوراً انهدامياً تشكل نتيجة عمليات تكتونية مثل حوضي بحر الميت ووادي الموت Death Valley في كاليفورنيا، في هذه الحالة تستطيع الأنهار أن تحت دون مستوى سطح البحر العالمي.

غير أنه يوجد مستويات دنيا للحت غير مستوى سطح البحر تعرف بمستوى القاعدة المحلي local base level، فتشمل الصخور الصلبة ذات المقاومة العالية للحت المائي، حيث تصبح هذه الصخور حواجز مؤقتة تؤدي إلى ارتفاع منسوب الماء أمامها، ولا يستطيع النهر أن يواصل عمليات الحت دونها. وكذلك إذا ما انتهت مياه النهر إلى بحيرة، فإن سطح مياه هذه البحيرة هو المستوى الأدنى للحت بالنسبة لهذا النهر. ويضاف إليها الأنهار الرئيسة التي تعمل كمستوى قاعدة لروافدها.

أما مستوى القاعدة المؤقت Temporary base level: فقد يتكون عندما تنتهي مياه النهر إلى بحيرة تمثل مستوى قاعدة محلياً (شكل ٣ـ١٩). فإذا كانت البحيرة ضحلة، تتراكم فيها الرسوبات تدريجياً، ويرتفع منسوب الماء فيها مع مرور الزمن، ويتشكل لها نهر مُصرِّف في نقطة أخفض من مستوى النهر الرافد، وعندها ينخفض منسوبها وتنصرف المياه منها تماماً، وتتحول في النهاية إلى مسطح من الرسوبات البحيرية، حيث يحفر النهر قناته فيها ليتابع جريانه في النهر المصرف.




شكل ٣-١٩: (١) - تأثير مستوى القاعدة المحلي على البروفيل الطولي للنهر.

(٢) - البروفيل الطولي للنهر بعد زوال البحيره واستمرار تعميق الوادي.

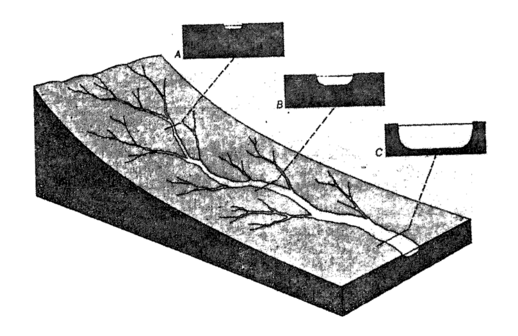
وقد لا ينظر إلى البحيرات والصخور الصلبة على أنها مؤقتة ولكنها تعد جيولوجياً، وعلى المدى الطويل، ظواهر غير دائمة ولا بد حتماً أن تنتهي جميع عمليات الحت إلى مستوى القاعدة النهائي (سطح البحر أو المحيطات).

## النهر الممهد The graded stream

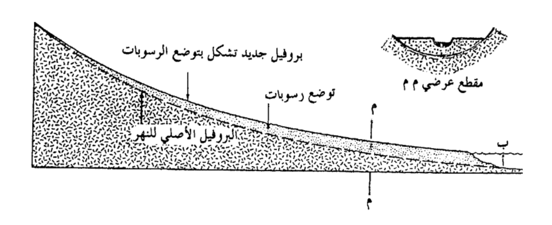
إن أية تغيرات في صبيب النهر، أو في مستوى القاعدة، أو في تركيب الصخور الذي يمر فوقها النهر، تؤدي إلى تعديل في شكل المقطع العرضي والبروفيل الطولي للقناة النهرية.

ففي مثل هذه التغيرات فإن النهر يعدل قناته بشكل تنخفض عدم النظامية إلى حدها الأدنى، ويؤمن أقل طاقة ممكنة لتستهلك في حركة المياه وحمل الرسوبات فقط. وهذا يشمل غالباً توسيع أو تعميق المقطع العرضي للقناة في حالة ازدياد الصبيب (فيضاناً، روافد جانبية) أو هبوط مستوى القاعدة (شكل ٣-٢٠). أو نقصان أبعاد القناة نتيجة الترسيب في حالة ارتفاع مستوى القاعدة، أو وجود صخور ذات مقاومة عالية في طريق النهر (شكل ٣-٢١). وبهذا يكون الاتجاه الاجمالي نحو بروفيل طولي ذي انحدار لطيف ومنتظم وهو بروفيل التوازن، حيث تكون جميع العوامل في حالة توازن. وقد استخدم الجيولوجيون مصطلح النهر الممهد للتعبير عن النهر الذي

وصل إلى مرحلة التوازن، حيث يكون له من الانحدار والمواصفات الأخرى ما يحافظ على سرعة كافية لحمل الرسوبات فقط. فالنهر الممهد لا يحت ولا يرسب وإنما يكتفي بنقل الرسوبات.




**شكل ٣ـ٢٠: مساهمة الروافد الجانبية في توسيع القناة النهرية.**




**شكل ٣ـ٢١: تغيير أبعاد القناة بنتيجة ارتفاع مستوى القاعدة.**

ومع أن مفهوم النهر الممهد محدد وواضح، إلا أن التوازن التام لا يتوقع أن يتحقق طبيعياً في أي نظام نهري. ففي حوض تصريف لأي نهر نموذجي لا بد من حدوث تغيرات تخل بهذا التوازن، إذ يمكن لسحابة ممطرة أن تزيد صبيب أحد الروافد النهرية، أو أن يؤدي حدوث انهيار في ضفة النهر إلى ازدياد كمية الرسوبات فيه بشكل مفاجئ، أو ان تقل سرعته اذا صادف النهر في طريقه صخوراً مقاومة للحت أو رسوبات معترضة. ففي مثل هذه الأحداث تأخذ عملية التعديل مجراها. إذ إن كل واحدة منها تخل بالنظام وتبعده عن حالة التوازن التام. ولهذا السبب نقول إن النهر قد وصل إلى مرحلة شبه متوازنة quasi - equilibrium لأن هناك تعديلات وتغيرات تجري بشكل مستمر.

## نقل الرسوبات بوساطة الأنهار Transport of sediments by streams

تلعب الأنهار و المجاري المائية دوراً فعالاً في تحريك المواد الرسوبية ونقلها، فهي تتوزع في اليابسة توزعاً واسعاً بالمقارنة مع توزع الجليديات. يضاف إلى ذلك أن وجودها يشمل مختلف مناطق اليابسة وليس محصوراً بالنطاقات الشاطئية بالمقارنة مع الأمواج والتيارات البحرية. كما أن مياه الأنهار قادرة على تحريك رسوبات ذات تنوع حجمي واسع يشمل الجلاميد الصخرية إذا ما قورنت بقدرة الرياح على النقل. وعلاوة على ذلك تشكل المياه الجارية على اليابسة أوساطاً كيميائية فعالة قادرة على حل المواد الصخرية والتفاعل معها.

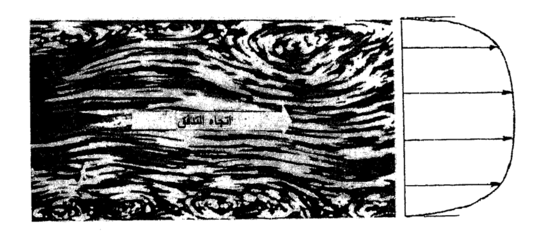
تنقل الأنهار حمولتها المؤلفة من:

١ـ مواد صلبة تشمل حبات خشنة تتحرك منزلقة على قاع النهر أو قريباً منه تدعى الحمولة السريرية bed load.

٢ـ حبيبات ناعمة تكون معلقة في النهر وتدعى الحمولة المعلقة suspended load، حيث يرسبها النهر فوق اليابسة وتعرف باللحقيات alluvium.

٣ـ مواد منحلة ناتجة عن التجوية الكيميائية تدعى الحمولة المنحلة dissolved load.

**أهمية التدفق المضطرب في نقل الرسوبات:** لقد رأينا سابقاً أن تحرك جزئيات الماء في النهر لا يكون بمعظمه تحركاً نظامياً موازياً للمجرى. فهي تتحرك في اتجاهات عديدة وبسرعات متباينة (التدفق المضطرب)، وإن الاضطراب عامل مهم في حركة الرسوبات النهرية. إذ يجعل الحبيبات الصغيرة معلقة في التيار المائي حيث تنقل إلى سافلة النهر. ويتولد الاضطراب بمحاذاة جوانب القناة النهرية وقيعانها حيث يواجه التيار المائي أعظم الاحتكاكات والإعاقة (شكل ٣-٢٢).




**شكل ٣-٢٢: يوضح التدفق المضطرب للتيار المائي في القناة النهرية كما تُرى من الأعلى. ويكون الاضطراب أعظمياً في جوانب القناة. ويوضح الرسم التخطيطي سرعة التيار المائي عبر القناة النهرية.**

**١- حمولة السرير النهري:** وتعرف أيضاً بحمولة القاع، فهي تتألف من قطع وشظايا وحبيبات فلزية وصخرية ناجمة من التجوية. تتراوح في حجومها من الجلاميد حتى الرمل الناعم. وإنه ليس من السهل التمييز ما بين حمولة القاع والحمولة المعلقة، لأن الحبات التي تتحرك بمحاذاة القاع في لحظة ما، يمكن أن تصبح معلقة إذا ارتفعت سرعة التيار والعكس صحيح، ومع ذلك تحت أي ظرف من الظروف لا بد من وجود جزء من حمولة السرير غير معلق بشكل دائم.

إن المعدل الوسطي لحركة حمولة السرير أقل من معدل حركـة الماء، لأن الحبـات ليست بحالة حركة ثابتة، فهي تتحرك بشكل متقطع، بالدحرجة rolling أو الانزلاق sliding أو القفز saltation، الذي تتحرك فيه الحبات مسافات قصيرة بقفزات تعـد حركة وسطية ما بين التعلـق والدحرجـة أو الانـزلاق. وتسـتمر الحبـات الرسـوبية في تقدمها على امتداد سرير النهـر. ويسـتمر القفـز مـا دامـت التيـارات المائيـة مضطربـة بشكل كاف لأن ترفع حجوم معينة من الحبات عن القاع، وإفساح المجال لها للهجـرة إلى مسافة نحو سافلة النهر، حتى تتغلب الثقالة وتجعلها تستقر. وتؤدي هذه العملية في كثير من الأحيان إلى تكسر الحبات، كما يـؤدي الاحتكـاك والاصطـدام النـاجم مـن عمليـة القفـز إلى تكسـير النتـواءات البـارزه في الحبيبـات، وجعـل سـطوحها ملسـاء ومدورة. أما القطع الكبيرة التي لا يستطيع التيار رفعها عـن القـاع، فإنهـا تتحـرك إلى الامام نتيجة دفع التيار لهـا، واعتمـاداً علـى شـكلها فإنهـا إما أن تـنزلق أو تتدحـرج (شكل ٣-٢٣).



**شكل ٣-٢٣: نقل الحمولة النهرية: أ ـ نقل الحمولة السريرية يكون بالدحرجة والانزلاق والقفز.**

**ب ـ نقل المواد السلتية والغضارية على شكل معلقات.**

وأما الجلاميد الكبيرة فتنقل بوساطة المياه النهرية أثنـاء الفيضانـات، كذلـك تنقـل بوساطة التيارات المائية القوية في المنحدرات الجبلية.

ومع أن حمولة السرير تتراوح ما بين ٥٪ ـ ٥٠٪ من الحمولـة الاجماليـة للنهـر إلا أنها ذات أهمية كبيرة بالنسبة لمقدرة النهر على تعرية قناته.

٢ـ الحمولة المعلقة Suspended load: إن الصفة العكرة لكثير من الأنهار ترجع إلى وجود الحبيبات الناعمة السلتية والغضارية المنقولة بالحالة المعلقة. غير أنه في حالة الفيضانات تزيد هذه الحمولة بشكل ملحوظ وتشمل معلقات ذات حجوم أكبر، كما هو الحال في النهر الأصفر في الصين، فقد قدرت حمولته في حالة الفيضانات بما يساوي وزن المياه الحاملة له. ويعود لونه إلى الحمولة الضخمة من السلت المنقول نحو البحر من رسوبات اللوس الواسعة الانتشار، والتي تبطن الجزء الأكبر من واديه.

يتحكم في نوع المواد المعلقة وكميتها عاملان: سرعة الماء وسرعة استقرار الحبيبات. أما سرعة الاستقرار settling velocity فهي السرعة التي تسقط فيها الحبيبات خلال السائل الموجودة فيه، فالحبيبات الأكبر تسقط بسرعة أكبر باتجاه قاع النهر. وكذلك يؤثر شكل الحبيبات وكثافتها في سرعة الترسيب، فالحبيبات المدورة والكثيفة تترسب بسرعة أكبر من الحبيبات المسطحة وذات الكثافة المنخفضة.

وبسبب أن سرعة التيارات الصاعدة المتشكلة في المياه النهرية المضطربة تزيد على السرعة التي تمكن الغضار والسلت من الاستقرار بفعل الثقالة الأرضية. فإن مثل هذه الحبيبات تميل لأن تبقى معلقة لفترة أطول فيما لو كانت المياه غير مضطربة. فهي قد تترسب وتستقر فقط عندما تهبط السرعة ويهدأ الاضطراب، كما هو الحال في سهول الفيضان والبحيرات والبحار. لذلك فإن نقل الحبيبات كحمولة معلقة يختلف بشكل كبير عن حبيبات حمولة القاع التي تتحرك فقط بالدحرجة والقفز. وتقدر كمية المواد المعلقة بنحو ثلثي الحمولة الاجمالية للأنهار.

إن معظم الحمولة المعلقة في الأنهار مشتقة من مصدرين. أحدهما الترب الناعمة المغسولة من مناطق غير محمية بغطاء نباتي بما فيها الحقول الزراعية، والثاني هو الرسوبات الخاضعة للحت أو المعاد تشغيلها من ضفاف المجرى النهري.

**٣- الحمولة المنحلة:** تأتي هـذه المـواد مـن عمليـات التجويـة الكيميائيـة للصخـور المحيطة من جهة، وفعل مياه النهر في الحل والاذابة من جهة أخـرى. وتتـألف الحمولـة المنحلة من ايونات معدنية ولا معدنية، حيث تشارك فيها بشكل رئيس سبعة ايونـات فقط من مجمل هذه الحمولـة، وهـي البيكربونـات والكلسـيوم والسـيليكا والسـلفات والكلور والصوديوم والمغنـيزيوم والبوتاسـيوم. أمـا النـترات والحديـد والفلـور فتوجـد بكميات ضئيلة جداً (جدول ـ٢).

| الايونات | الرمز الكيميائي | جزء بالمليون |
|---|---|---|
| البيكربونات | $(HCO3)^{-}$ | ٥٨,٤ |
| الكلسيوم | $(Ca)^{+2}$ | ١٥ |
| السيليكا | $(SiO2)$ | ١٣,١ |
| السلفات | $(SiO4)^{-}$ | ١١,٢ |
| الكلور | $(Cl)^{-}$ | ٧,٨ |
| الصوديوم | $(Na)^{+}$ | ٦,٣ |
| المغنيزيوم | $(Mg)^{+2}$ | ٤,١ |
| البوتاسيوم | $(K)^{+}$ | ٢,٣ |
| النترات | $(NO3)^{-}$ | ١ |
| الحديد | $(Fe)^{+2}_{+3}$ | ٠,٧ |

**جدول ٢- المعدل الوسطي لكمية المواد المنحلة في مياه الأنهار العالمية.**

تقدر كمية المواد المنحلة في مياه الأنهار بوحدة أجزاء المادة المنحلة بمليـون وحـدة من الماء (جزء بـالمليون). وقـد ترتفـع في بعـض الأنهـار لتصـل إلى نحـو ١٠٠٠ جـزء بالمليون، إلا أن المعدل الوسطي لهذه المواد يتراوح ما بين ١١٥ و١٢٠ جزءاً بـالمليون. وتختلف كميتها من نهر لآخر حسب طبيعة المناخ وجيولوجية المنطقة. وهـي تسـاهم بأقل من ١٠٪ من مجموع الحمولة النهرية.

## الكفاية والاستيعاب النهري

عندما يتحول نهر هادئ الجريان إلى نهر مضطرب أثناء موسم الفيضان، فإن قابليته على نقل الرسوبات تزداد بشكل واضح، وتحدد عادة هذه القابلية بمصطلحي الكفاية النهرية والاستيعاب أو الاستطاعة النهرية.

الكفاية competence النهرية هي أقصى حجم للحبات الرسوبية، التي يستطيع النهر نقلها تحت مجموعة من الشروط الهيدرولوجية. وتقاس عادة بقطر أكبر الحبات الرسوبية التي يمكن أن تتحرك كحمولة للقاع النهري. تعتمد كفاية النهر بشكل رئيس على سرعة التيار الناقل، إلا أنها ليست متناسبة معها بشكل بسيط. فإذا ارتفعت السرعة إلى الضعف زاد قطر الحبيبات المنقولة مثلاً من ٢مم إلى ٦٤مم أي بمقدار (٢^٦) مرة. وهذا يفسر كيف تتحرك جلاميد كبيرة أثناء الفيضان، لدرجة تستطيع مياه الفيضان أن تخرب الجسور والسكك الحديدية، بينما لا يمكن للنهر في الشروط العادية أن ينقل سوى حصيات ناعمة.

تتغير كفاية التيار المائي من مكان لآخر على طول المجرى، بحيث يمكن أن تظهر هذه التغيرات في الرسوبات النهرية المتكشفة على جانبي المجرى، التي تظهر فيها تناوب رسوبات خشنة وناعمة وهي سجل لتغير كفاية المياه النهرية.

أما الاستيعاب capacity فهي الحمولة القصوى التي يستطيع النهر نقلها من المواد الصلبة. وتقاس بحجم الرسوبات التي تمر من نقطة معينة من القناة النهرية في وحدة زمنية. وهي تعتمد بشكل رئيس على الصبيب النهري، وانحدار القناة النهرية، وطبيعة المواد الرسوبية. وقد أظهرت تجارب مخبرية، محددة الشروط، أن ازدياد الانحدار والصبيب مع ثبات الشروط الأخرى يؤدي إلى ازدياد الحمولة النهرية، وقد أثبتت القياسات الحقلية ذلك.

إن وجود المواد الخشنة في حمولة السرير النهري يزيد في وعورة القناة النهرية، التي تؤدي إلى انخفاض في سرعة التيار المائي، التي تؤثر بدورها في انخفاض إستطاعة النهر على حمل المواد الصلبة.

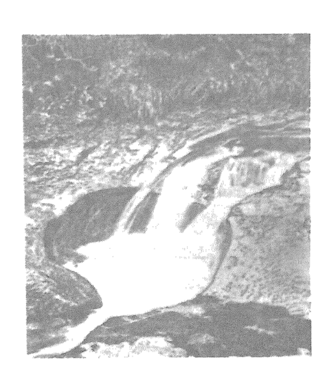
## الحت النهري Stream erosion

تقوم المجاري المائية بحت أقنيتها في عدة طرائق مختلفة أهمهـا رفـع وتحريـك المـواد المفتتة غـير متماسـكة، وبوسـاطة الـبري أو السـحج abrasion، وبوسـاطة عمليـات الاذابة.

يبدأ العمل الحتي للأنهار من سقوط المطر على اليابسة، فـإن اصطدامهـا بـالأرض يكون له قدرة على تحريك الحبيبات من التربة، ويكـون ذلـك واضحـاً عندمـا تكـون الأمطار غزيرة وفي حالة العواصـف المطريـة، حيـث تجـري الميـاه علـى سـطح الأرض وتكتسب قوة احتكاكية كافية لتحريك ونقل المواد المفتتة. وعندما تتجمع هـذه الميـاه في الأقنية النهرية يصبح لها قدرة تحريكية أكبر بفعـل الجريـان المضطـرب، الـذي ينتـج منـه حركة المياه في دوامات واتجاهات مختلفـة، إذ تسـتطيع تحريـك المـواد الرسـوبية مـن الرمـل الخشن حتى الجلاميد الكبيرة. ويساعد على هذا التحريك الهيدروليكي hydraulic action كون المواد الصلبة الموجودة في الماء ذات وزن أقل من وزنهـا العـادي، حتـى إن الميـاه النهرية تستطيع أن تندفع بقوة داخل الشقوق وبين سطوح التطبـق لتقتلـع أجـزاء مـن مكونات قاع القناة النهرية.

يتضمن العمل الحتي للأنهار أيضاً التأثير الميكـانيكي للميـاه، النـاجم مـن احتكـاك المواد الصلبة مع القاع والجوانب ومع بعضها بعضاً، مما يؤدي إلى اهتراء الصخور الـتي تتحرك فوقها المياه، وتحطيم وسحق المواد المنقولة، وهذا ما يسمى البري أو السـحج. وكذلك فإن اصطدام القطع الصخرية مع بعضها ومع صخور القناة النهرية يـؤدي إلى تكسرها، وهذا يكون واضحاً في مساقط الشلالات.

من المظاهر الشائعة في قيعان بعض الأودية النهرية وجود منخفضات دائرية تعرف بالحفر الوعائية pot-holes (شكل ٣-٢٤) تشكلت نتيجة العمل الحتي للجزئيات التي تتحرك في شكل دوامات، حيث تعمل الحركة الدائرية السريعة لحبات الرمل والحصى كأداة حفر لحفر قاع الوادي النهري، وباستمرار هذه الحركـات الدواميـة ينتـج منهـا حفر قد تصل إلى بضعة أمتار في عمقها وطولها.



**شكل ٣- ٢٤ - حفرة وعائية في قاع وادي نهري.**

يضاف إلى ذلك أفعالاً كيميائية ناجمة عن وجود مواد حمضية في المياه النهرية التي تتفاعل مع صخور القناة النهرية وتؤدي إلى انحلالها، وتعرف هذه العملية بالتآكل corrosion، ويكون هذا واضحاً في القناة النهرية المكونة من الصخور الكلسية.

إن العمليات الحتية النهرية ليست ثابتة أو مستمرة. فقد تمضي أسابيع عديدة دون عمليات حتية تُذكر. إلا أنها تعود وتنشط خلال فترات العواصف المطرية والفيضانات، كما تنشط في موسم الربيع إثر ذوبان الثلوج، وقبل عودة الحياة النباتية إلى النشاط.

## تشكل الأودية النهرية

تتشكل معظم الأودية التي تجري فيها مياه الأنهار بفعل ثلاث عمليات مترابطة ومتلازمة وهي:

١ـ تعميق الوادي. ٢ـ توسيع أو تعريض الوادي. ٣ـ إطالة الوادي.

**١ـ تعميق الوادي:** تكون عملية تعميق الوادي شديدة وواضحة في المناطق التي يكون ارتفاعها عن المنسوب القاعدي كبيراً. وهذا يتحقق في المرتفعات الجبلية، حيث يؤدي الحت الشاقولي إلى تعميق الوادي النهري، نتيجة اندفاع المياه وتحرك كتلتها الضخمة مع ما تحمله من مفتتات وقطع صخرية فوق سطوح شديدة الانحدار. ويتميز هذا الجزء من النهر بوجود المساقط المائية والجداول السريعة وينعدم فيه توضع الرسوبات. وبصورة عامة يؤدي تشكل الحفر الوعائية في قاع الوادي النهري إلى تعميقه.

**٢ـ توسيع الوادي:** إن توسيع الوادي النهري يكون في حت المواد التي تتألف منها جوانب الوادي، إذ إن ضرب المياه مع ما تحمله من رسوبات وحطام صخري يؤدي إلى تخريب أجزاء قاعدية منها، وبالتالي إلى انهيار الأجزاء العليا في مياه النهر، وبهذا يتوسع الوادي جانبياً. وبالوقت نفسه تشكل الكتل الصخرية المنهارة عوائق تؤدي إلى دوامات مائية تحفر في القاع وتعمق الوادي.

لا توجد مرحلة معينة يبدأ فيها النهر بتوسيع واديه، وانما يحدث ذلك في المراحل المبكرة من تشكل الوادي. حيث يكون المجرى المائي في هذه المرحلة كثير الانحناءات، فتضطر المياه ومفتتاتها أن تتجه نحو خارج المنحنيات فتحفر الضفة الخارجية المقعرة، في حين توضع اللحقيات في الزاوية الميتة الداخلية المحدبة. ويكون من نتيجة هذا الفعل المضاعف زيادة تقوس المنحنيات وتعريض الوادي.

**٣ـ إطالة الوادي:** تتم بعدة طرق أهمها:

**أ ـ الحت التقهقري أو الحت الصاعد Headward erosion:** يجري الحت النهري في هذا النمط من سافلة النهر باتجاه عاليته. ويكون واضحاً في أسفل المنحدرات وفي

تراجع الشلالات. حيث تكون سرعة التيار المائي واستطاعته أعظمية في أسفل المنحدر، مما يؤدي إلى خلق موجة حتية تصعد من أسفل المنحدر باتجاه عاليته، وتتضاءل شدة المنحدر بنتيجة عملية الحت هذه ويزداد النهر طولاً.

**ب ـ تشكل المنعطفات النهرية:** يؤدي تشكل المنعطفات النهرية إلى زيادة في طول الوادي النهري.

**حـ ـ زيادة أطوال الأنهار عند مصباتها:** يحدث ذلك عندما ينخفض منسوب ماء البحر الذي ينتهي إليه النهر، مما يؤدي إلى أن يشق النهر طريقه عبر الأراضي الجديدة التي ظهرت.

**د ـ نمو الدلتات:** يزداد طول بعض الأودية النهرية في الحالات التي تنمو فيها دلتاتها داخل مياه البحر.

## الترسيب النهري

يبدأ النهر بالترسيب عندما يفقد استطاعته على حمل الرسوبات التي تنقلها مياهه، أو التي تجلبها إليه عوامل أخرى. وينتج فقدان استطاعته من انخفاض سرعة التيار المائي الذي يرجع للأسباب التالية:

١ـ تناقص انحدار مياه النهر في انتقاله من منطقة مرتفعة إلى منطقة سهلية منبسطة.

٢ـ تعرض مجرى النهر لحركات تكتونية قد تؤدي إلى التغيير في بروفيله الطولي أو ازدياد في تعرجاته.

٣ـ زيادة انتشار مياه النهر على مساحة أوسع. ويحدث هذا غالباً في أيام الفيضانات حيث تفيض مياهه على كلتا ضفتيه والأراضي المجاورة.

٤ـ وجود بعض السدود الطبيعية أو الاصطناعية في طريق المجرى المائي الناجمة من انزلاق الأراضي أو بناء السدود.

٥ـ نقصان كمية مياه النهر إما لأسباب مناخية أو لتسرب مياه النهر عبر صخور نفوذة في واديه.

٦ـ توقف سرعة التيار المائي عندما ينتهي إلى مستوى قاعدة محلي أو أساسي.

## المظاهر الترسيبية للأنهار Depositional features of stream

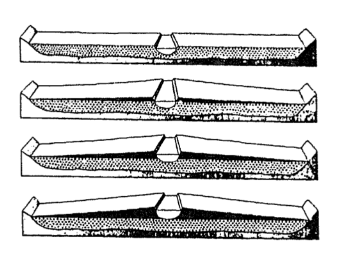
### ١ـ السهول اللحقية أو سهول الفيضان Flood plains

تتشكل السهول اللحقية في الأماكن السهلية الممهدة، حيث يتعوج النهر بمنعطفات عديدة. وتتكون رسوباتها من الرمال الخشنة والحصى الصغيرة التي ترسبت أصلا كرسوبات حواجز رئيسة على طول المجرى المتعوج (شكل ٣ـ١٦ـ أ). ومع مرور الوقت تصبح التوضعات النهرية شديدة السماكة ومتصلة بحيث لا ينكشف إلا القليل من المهد الصخري على طول المجرى.

وفي أيام الفيضانات يجلب النهر كميات كبيرة من المياه المحملة بالرسوبات، فيمتلئ المجرى المائي بالمياه وتفيض وتغمر الأراضي السهلية المجاورة مكونة سهول الفيضان التي تتكون من مواد ناعمة من الرمل والسلت والغضار.

تبني الأنهار الكبرى في مواسم الفيضان طبقات سميكة من الرسوبات على ضفافها تعرف بالسدود الطبيعية natural levees (شكل ٣ـ٢٥). تنشأ هذه السدود نتيجة تجاوز المياه المحملة بالرسوبات ضفاف النهر لتغمر السهل اللحقي، حيث تنخفض سرعتها بشكل مفاجئ، وتضع قسماً كبيراً من حمولتها الخشنة (الرمل والسلت) بالقرب من جوانب النهر، وتضع المواد الأنعم فوق بقية السهل اللحقي.

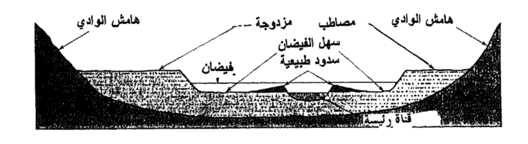
وبمرور الزمن وبتكرار عمليات الفيضان يزداد تراكم الرسوبات، وتكون سماكتها أعظمية بمحاذاة القناة النهرية، وتنخفض تدريجياً بالابتعاد عنها. وتكون بمستوى أعلى من مستوى سهل الفيضان، لذلك فإن المياه لا تعود إلى القناة النهرية بعد زوال الفيضان، وقد تبقى لفترة طويلة مشكلة مستنقعات خلف هذه السدود.



**شكل ٣-٢٥: مراحل تشكل السدود الطبيعية. ويلاحظ في الشكل توسع القناة النهرية وارتفاع قاعها لأن العمل الحتي والترسيبي يكونان في أقصى نشاطهما في أيام الفيضان.**

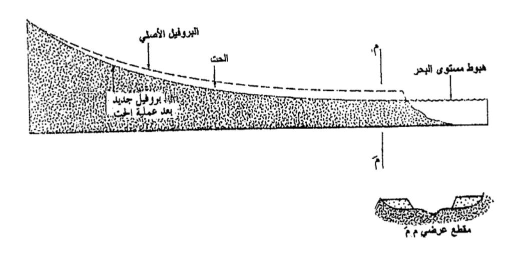
## ٢- المصاطب النهرية

تحتوي معظم الأودية النهرية على مصاطب terraces وهي سهول فيضان مهجورة، تشكلت عندما كان النهر يجري في مستويات أعلى من مستواه الحالي (شكل٣-٢٦).




**شكل ٣-٢٦: تشكل المصاطب المزدوجة بنتيجة الحت الشاقولي في توضعات سهل الفيضان.**

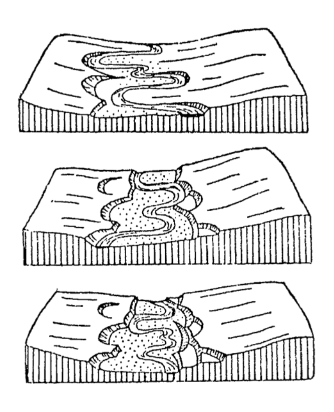
توجد المصاطب في بعض الوديان في عدة مستويات مشيرة إلى تاريخ معقد لأحداث النهر. وتسمى المصاطب الموجودة على جانبي الوادي والتي تقع في المستوى نفسه بالمصاطب المزدوجة paired terraces، وتكون عادة من العمر نفسه، وتنتج من هجر النهر لسهل فيضانه القديم، وذلك عندما يبدأ النهر بتعميق مجراه. ويتشكل هذا النوع من المصاطب عندما تحصل تغيرات في مستوى سطح البحر بالنسبة لليابسة. فعندما ينخفض مستوى سطح البحر يزداد انحدار النهر وينشط الحت الشاقولي في مجراه باتجاه تراجعي، مما يؤدي إلى تكشف توضعاته السابقة على شكل مصاطب مزدوجة (شكل ٣-٢٧).




**شكل ٣-٢٧: تطور البروفيل الطولي للنهر تحت تأثير إنخفاض مستوى القاعدة وتشكل المصاطب المزدوجة.**

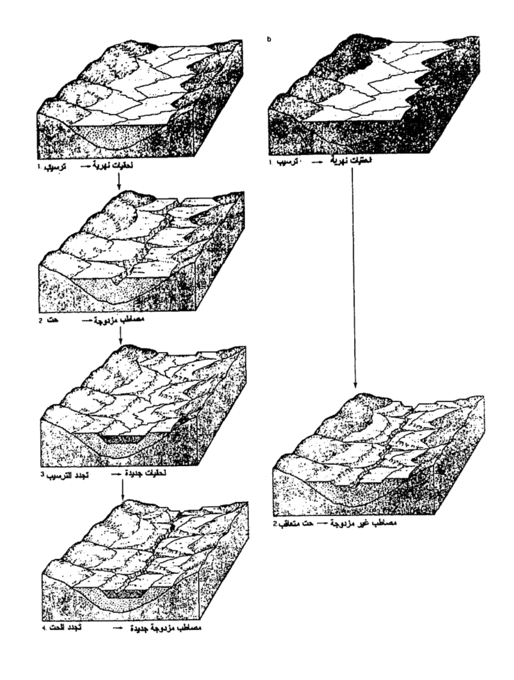
أما المصاطب الموجودة في جهات متقابلة من النهر والتي تكون في مستويين مختلفين فتعرف بالمصاطب غير مزدوجة Unpaired terraces وتكون مختلفة في العمر، لأن النهر لا يمكن أن يجري في مستويات مختلفة في الوقت نفسه، إن وجود هذا النوع من المصاطب دليل كافٍ على أن عمليات الحت الشاقولي حدثت في الوقت الذي كان فيه النهر يوسع مجراه بوساطة الحت الجانبي. ويتشكل هذا النوع من المصاطب في مناطق المنعطفات النهرية

وتكون في غاية من التعقيد وعدم الانتظام، لأن المجرى النهري في مناطق المنعطفات كثير التغيير، حيث تزحف المنعطفات بشكل مستمر نحو المصب، مما يؤدي إلى إزالة المصاطب في أحد جوانب النهر وإبقائها في جانب آخر (شكل ٣-٢٨).



**شكل ٣-٢٨: تشكل المصاطب غير المزدوجة في مناطق المنعطفات النهرية.**

إن التمييز بين المصاطب المزدوجة وغير المزدوجة أمر مهم. إذ إن كل مجموعة من المصاطب المزدوجة تدل على فترة ترسيبية لتشكل سطحاً رسوبياً [شكل ٣-٢٩،(١و٣)]. أو حتاً جانبياً عبر اللحقيات أو صخور المهد، تتبعها عملية حت شاقولي [شكل٣-٢٩،(٢و٤)]. وبهذا نستطيع أن نقول إن تشكل المصاطب المزدوجة يشمل مراحل متعاقبة من الترسيب (aggradation) والحت الشاقولي (degradation). وبالمقابل فإن مجموعة من المصاطب غير مزدوجة لا تعكس إلا مرحلة واحدة من عملية الحت الشاقولي (شكل ٣-٢٩، b).




**شكل ٣-٢٩: a - مراحل تشكل المصاطب المزدوجة.**

**b - تشكل المصاطب غير المزدوجة.**

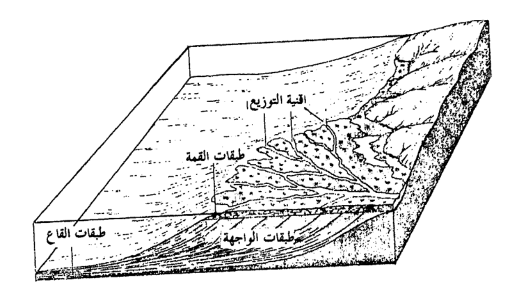
## ٢ـ الدلتات والمراوح اللحقية

إن نهاية المطاف للمياه الجارية على اليابسة هي البحار والمحيطات. فالمجاري المائية الصغيرة ترفد الأكبر منها، وهي بدورها ترفد المجاري الرئيسة التي بدورها تصب في البحار. والقليل من الأنهار التي تضيع مياهها قبل وصولها إلى البحر، وهذا يحدث في مناطق تكشفات الصخور الكلسية ذات الحت الكارستي، حيث تتسرب مياهها عبر فتحاتها النفوذة، يضاف إلى ذلك أنهار المناطق الجافة التي تضيع مياهها تدريجياً بالتبخر والارتشاح داخل الأرض. كما توجد أنهار تصب في بحيرات ليس لها مخرج مثل الأنهار التي تصب في البحيرات المالحة.

تتناهى سرعة مياه النهر في منطقة مصبه في البحر إلى الصفر، ويرسب جزءاً كبيراً من حمولته الخشنة والناعمة، ويبقى جزء من المواد الغضارية معلق في مياه البحر ليتوضع بعيداً عن الشاطئ. وينشأ من هذا الردم الرسوبي المستمر جزء جديد ينضم إلى اليابسة ويدعى بالدلتا delta، ويوجد لها امتداد تحت سطح البحر. ومن الممكن أن تنشأ الدلتات كلياً تحت البحر بسبب التغيرات في الامداد الرسوبي من وقت لآخر.

تتوضع المواد المحمولة عند مدخل النهر على شكل طبقات متدرجة في حجوم حبيباتها، حيث تكون الخشنة باتجاه النهر والناعمة باتجاه البحر. وتزداد سماكة هذه الرسوبات نتيجة تراكم الطبقات المتعاقبة. وتنمو الدلتا وتتقدم تدريجياً باتجاه البحر، مشكلة سهلاً مثلث الشكل رأسه عند مصب النهر وقاعدته باتجاه البحر.

يعرف الجزء المنحدر من الدلتا والمؤلف من رسوبات خشنة بطبقات الواجهة foreset layers، والطبقات الأقل سماكة والمؤلفة من حبيبات أنعم وتغطي القاع لمساحة واسعة بطبقات القاع bottomset layers. وهكذا تتوضع الطبقات فوق بعضها بعضاً، وتتقدم طبقات الواجهة الخشنة تدريجياً فوق طبقات القاع. ويمتد النهر تدريجياً نحو البحر فوق الدلتا المتشكلة، ويستطيل مجراه أثناء الفيضان، ويحت أعلى طبقات الواجهة ويوضع رسوباته فوق طبقات الواجهة مشكلاً طبقات القمة topset layers (شكل ٣ـ٣٠).




**شكل ٣-٣٠: رسم تخطيطي يوضح المظاهر الرئيسة للدلتا.**

ومع استمرار الترسيب في الدلتا ترتص الطبقـات السـفلية بـالوزن المتزايد فوقهـا، ويزداد انحدار الطبقات العلوية، مما يؤدي إلى عدم الاستقرار، وحدوث انزلاقات تحت بحرية تؤدي إلى نقل المواد الرسوبية الدلتاوية إلى نطاقات بحرية عميقة، وتتوضـع علـى مساحات كبيرة، وتدعى في هذه الحالة رسوبات العكر turbidity sediments.

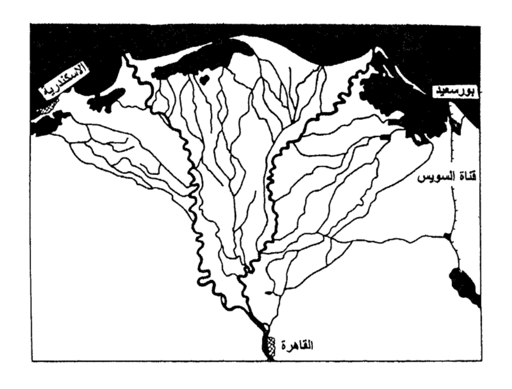
يتفرع مجرى النهر عادة فوق سطح الدلتا مشكلاً عدداً من المجاري تعرف بأقنيـة التوزيع distributary channels، حيث تجري فيها الميـاه بشـكل مسـتقل. ويعطـي التوزع الشعاعي لهذه الأقنية شكل مثلث يشبه الحرف اليوناني (Δ) الـذي اشـتق منـه اسم الدلتا.

تشكل بعض الأنهار العظمى في العالم دلتات ضخمة عند دخولها في البحـر. وان لكل منها صفات مميزة تحددها عوامل مختلفة أهمها:

١ـ تصريف النهر.
٢ـ صفات الحمولة.
٣ـ شكل الشاطئ وطبيعته.
٤ـ طبوغرافية المنطقة البعيدة عن الشاطئ.
٥ـ شدة الأمواج والتيارات البحرية واتجاهاتها على طول الشاطئ.

وفي جميع الأحوال تتشكل الدلتات وتنمو باتجاه البحر، إذا كانت نسبة الرسوبات تفوق نسبة المواد التي تنقل من الشاطئ.

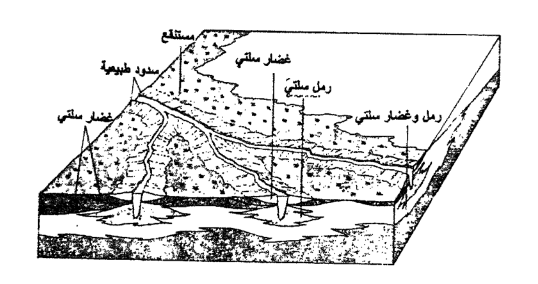
تعد دلتا نهر النيل ودلتا نهر الميسيسبي من أضخم وأشهر الدلتات المعروفة في العالم. أما دلتا النيل فتتألف من مساحة مثلثة الشكل (شكل ٣ـ٣١) وقد أتت التسمية من شكل هذه الدلتا.




شكل ٣ـ٣١: دلتا نهر النيل.

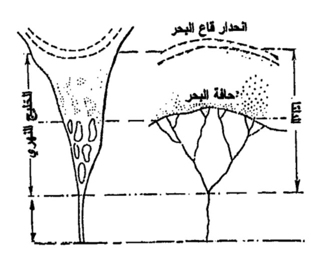
أما دلتا نهر الميسيسبي فتتألف من عدد من أقنية التوزيع التي تتوجه إلى خليج المكسيك، ويشبه شكلها الاجمالي رجل الطير لذلك تدعى دلتا رجل الطير bird - foot delta، وتتميز مجاري الأقنية بأنها عميقة ومتطاولة في اتجاهات شبه مستقيمة، وتمتد لمسافات كبيرة في مياه خليج المكسيك (شكل ٣-٣٢)، ويعود نشوء هذه الظاهرة إلى أن المواد الخشنة التي ينقلها النهر تتوضع على طول مجاري الأقنية، بينما تتوضع المواد الناعمة حول وبين الأقنية مشكلة حواجز غضارية شديدة التماسك على جانبي كل فرع. وقد حالت هذه الحواجز دون انحناء هذه الفروع بوساطة الحت الجانبي، وأدت إلى حصر عمل مياه الأقنية في تعميق واديها بالحت الشاقولي فقط.

تغطي دلتا نهر الميسيسبي نحو ٣١,٠٠٠كم² (عدا الجزء المغمور بمياه البحر). وهي دلتا معقدة تشكلت من اندماج عدد من الدلتات الثانوية بنيت خلال بضعة آلاف من السنين. وقد عدلت أشكالها كثيراً بتأثير الحت الشاقولي، والهبوط التدريجي لليابسة الناجم من الثقل الهائل للرسوبات.




شكل ٣-٣٢ رسم تخطيطي يبين تشكل دلتا نهر الميسيسبي.

تعد الدلتا صفة مميزة لعدد من الأنهار الكبيرة، مع أن هنالك كثيراً من الأنهار ليس لها دلتا. وذلك لعدم توافر شروط الدلتا. يعد نهر الأمازون من أكبر الأنهار في العالم ولكن لم تتكون له دلتا. وفي الحالات التي لا تتوضع فيها الرسوبات عند مدخل النهر في البحر، يتشكل ما يسمى الخليج النهري Estuary (شكل ٣ـ٣٣). ويمكن أن يحصل حين اختلاط مياه النهر العذبة المحملة بالغضاريات، بمياه البحر الملحة تَشَكُلْ سدادة موحلة بنتيجة الفعل الكترولييتي لمياه البحر، الذي يؤدي إلى ندف أو تخثر المعلقات الغضارية شبه الغروية. وقد يؤدي التراكم المستمر للمواد الغضارية إلى تحول الخليج النهري إلى دلتا.

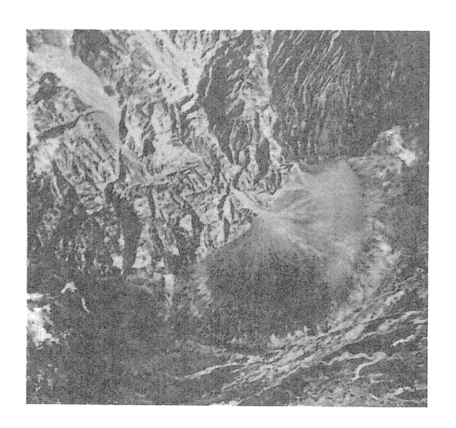



شكل ٣ـ٣٣ يوضح حالات تشكل الدلتا والخليج النهري.

## المراوح اللحقية: Alluvial fans

إن المراوح اللحقية مشابهة للدلتات، إنما تتشكل داخل اليابسة في الأماكن التي يتغير فيها جريان الأنهار من مناطق ذات تضاريس حادة وانحدارات شديدة إلى مناطق

سهلية، حيث تنخفض سرعة تياره المـائي ويُضيِّع جـزءاً كبـيراً مـن طاقتـه، ويرسـب الكثير من حمولته الرسوبية بشكل مروحي، ضيق باتجاه عاليـة النهـر وواسـع في اتجـاه المناطق السهلية. وتتنوع المواد الرسـوبية في هـذه المـراوح مـن الجلاميـد الصخريـة إلى الحصى والرمال وبعض المواد الناعمة. ويمكن أن تنزاح المجـاري النهريـة فـوق المـراوح اللحقية باتجاهـات جانبيـة تجعلهـا تشـكل مـراوح جديـدة. وهـذا يـؤدي إلى تشـكل مساحات واسعة مغطاة بالمراوح اللحقية. وقد يتشعب النهر بين هذه المراوح في أقنيـة متعددة تبني بدورها مراوح ثانوية متداخلة (شكل ٣-٣٤).



**شكل ٣-٣٤ المراوح اللحقية.**

إن البروفيل الطولي للمروحة مـن قمتهـا إلى قاعدتهـا لـه الشـكل نفسـه للمنحـنى المميز للبروفيل الطولي للأنهار. ويعتمـد هـذا البروفيل بشـكل رئيـس علـى تصريـف وحجـم جزئيـات particles الحمولـة السـريرية للنهـر. لذلـك لا توجـد مروحتـان

متماثلتان تماماً. فالمجرى المائي الصغير الذي يحمل مواد خشنة يبني مروحة أقصر وأشد انحداراً من النهر الكبير الذي يحمل مواد أنعم. وبصورة عامة تنسب مساحة المروحة إلى مساحة عالية النهر التي تشتق منها الرسوبات.

## التطور الطبوغرافي لليابسة في مناطق المجاري المائية

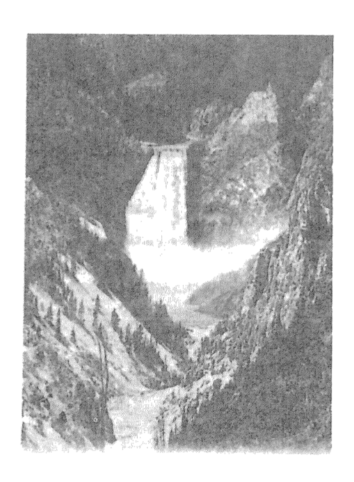
لقد حدد مفهوم هذا التطور من قبل العالم الجيومورفولوجي وليام ديفيس William Davis وغيره من المشتغلين في هذا المضمار، بأن التضاريس في هذه المناطق تخضع إلى تغيرات تدريجية تجري في خطوات مميزة هي مرحلة الشباب ومرحلة النضج ومرحلة الشيخوخة.

تكون التضاريس في مرحلة الشباب youth stage حادة شديدة الانحدارات، بسبب عمليات نهوض اليابسة. وتكون فيها أنظمة المجاري المائية سريعة الحركة وعالية الطاقة، بحيث تحفر أقنيتها نحو الأسفل، وتأخذ مقاطعها شكل الحرف V. ويتشكل فيها الكثير من الشلالات والمجاري السريعة بسبب عدم النظامية والتجانس في الصخور. وقد تحوي القواسم divides بين هذه المجاري منخفضات صغيرة تتجمع فيها مياه راكدة مستنقعية (شكل ٣-٣٥).

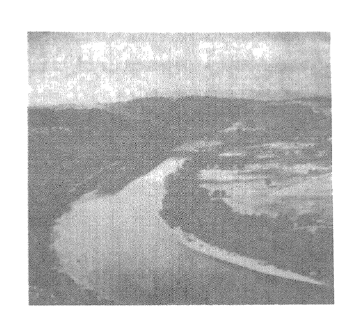
يلي مرحلة الشباب مرحلة النضج mature stage، التي تتميز بتضاؤل القواسم بين المجاري وزوال بروزاتها الصخرية الحادة، وتصبح السطوح التضاريسية أكثر تدوراً، وتأخذ المجاري المائية بتوسع أقنيتها باتجاهات جانبية، ويضعف الحت الشاقولي وتتطور المنعطفات النهرية وسهول الفيضان (شكل ٣-٣٦).

أما مرحلة الشيخوخة old age فتبدأ مع استمرار اهتراء التضاريس المرتفعة، وتضاؤل طاقة التيارات المائية، ووصول عمليات الحت الشاقولي إلى حدودها الدنيا. وتصبح الأودية عريضة وواسعة، وتتلاشى القواسم لتصبح التضاريس شبه متموجة. كما تتعوج الأنهار في منعطفات عديدة ومعقدة عبر سهولها اللحقية، ويكثر وجود البحيرات المقتطعة (بحيرات طوق الثور) شكل (٣-٣٧). وتنتهي هذه المرحلة بزوال التضاريس بحيث تصبح المنطقة سهلاً ممهداً peneplain، ولا يوجد في الوقت الحاضر

من السهول الممهدة إلا أمثلة قليلة جداً، لأن استمرار نشاط القوى الداخلية للأرض ينهض بأجزاء واسعة من القارات إلى مستويات مرتفعة، قبل أن تصل فيها المجاري إلى الشيخوخة.

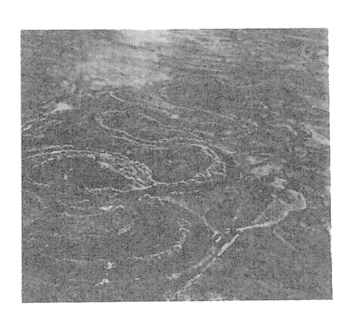


**شكل ٣ـ٣٥: طبوغرافية اليابسة في مرحلة الشباب.**



**شكل ٣-٣٦: طبوغرافية اليابسة في مرحلة النضج.**

يوضح الشكل تضاريس لطيفة ومدورة ومنعطفاً نهرياً عريضاً، وسهلاً لحقياً ضيقاً.



**شكل ٣-٣٧: طبوغرافية اليابسة في مرحلة الشيخوخة.**

يوضح الشكل تضاريس ممهدة ومنعطفات نهرية شديدة الانحناء، وسهلاً لحقياً واسعاً. كما يوضح البحيرات المتقطعة والسدود الطبيعية (اللون الفاتح).

وهنا يمكن الاشارة إلى وجود عدد من الأمثلة عن أشكال اليابسة التي صنعتها المجاري المائية، والتي يمكن تحديد المرحلة التي وصلت إليها، وبالمقابل توجد أمثلة أخرى لا يمكن أن تحدد فيها مراحل التطور المذكورة آنفاً، وبخاصة تلك التي تقع في مناطق شديدة البرودة أو غزيرة الأمطار وكثيفة الغابات، أو في مناطق صحراوية جافة.

# الفصل الرابع

# المياه الجوفية

تعد المياه الجوفية مصدراً مهماً لتأمين الماء الضروري لحياة الإنسان والحيوان والنبات وتطور الحياة الإنسانية. وقد استعمل الإنسان المياه الجوفية منذ بداية التاريخ، وحفرت ملايين الآبار في العالم للبحث عن مصادرها واستغلالها. كما أنها تلعب دوراً كبيراً في تجوية الصخور، وبخاصة الكربوناتية، حيث يؤدي انحلالها إلى تشكل الكهوف والمغاور.

ولهذا لا بد لنا من فهمها ومعرفة جيولوجيتها، لكي نحافظ على مصادرها ونحسن استغلالها. وقد أصبحت دراسة المياه الجوفية في الوقت الحاضر علماً قائماً بذاته، تزداد أهميته سنة بعد سنة وهو علم الهيدروجيولوجيا Hydrogeology.

## أصل المياه الجوفية Origin of ground water

المياه الجوفية هي المياه الموجودة في فراغات المهد الصخري والريغوليت. وبالرغم من ضخامة كميات المياه المخزونة فهي لا تزيد على ستة أعشار من الواحد بالمائة (٠,٦٪) من مجمل المياه الموجودة بالكرة الأرضية (جدول ٣)، كما أن حجمها أكبر بـ (٣٥) مرة من حجم مياه البحيرات والأنهار الموجودة في العالم.

| توزع المياه | الحجم بآلاف كم$^3$ | النسبة المئوية الحجمية |
|---|---|---|
| الأنهار. | ١,٢٥ | ٠,٠٠٠١ |
| الغلاف الجوي. | ١٣ | ٠,٠٠١ |
| رطوبة التربة. | ٦٧ | ٠,٠٠٥ |
| مياه البحيرات العذبة. | ١٢٥ | ٠,٠٠٩ |
| البحيرات المالحة والبحار القارية. | ١٠٤ | ٠,٠٠٨ |
| المياه الجوفية إلى عمق (٤)كم. | ٨٣٥٠ | ٠,٦١٥ |
| الجليديات. | ٢٩٢٠٠ | ٢,١٥٠ |
| المحيطات. | ١٣٢٠٠٠٠ | ٩٧,٢١٢ |
| المجموع | ١,٣٥٧,٨٦٠ | ١٠٠,٠٠٠١ |

**جدول ٣ ـ توزع المياه في الكرة الأرضية.**

لقد شغل موضوع منشأ المياه الجوفية عدداً كبيراً من الفلاسفة القدماء، وانتهوا للقول ان المصدر الرئيس للمياه الجوفية هو المياه الجوية meteoric water، التي تهطل على سطح الأرض على شكل أمطار وثلوج، قسم منها يجري على سطح الأرض، وقسم منها يعود مباشرة للجو بالتبخر، وقسم منها يتسرب تحت السطح ليكوّن المياه الجوفية.

وقد وجد العلماء أن الماء الخلالي connate water والماء البكر juvenile water الآتي من الأبخرة والغازات المتحررة من المغمات والنشاطات البركانية، يساهم بنسبة ضئيلة في تكوين الماء الجوفي. أما الماء الخلالي فهو الماء المتحرر أثناء تشكل الصخور الرسوبية. فأثناء عمليات الترسيب تحتبس الرسوبات كميات كبيرة من الماء، كما تحتفظ

الصخور الرسوبية بقسم من هذا الماء ويعرف بالماء المستحاث fossil water ويتحرر القسم الآخر أثناء عمليات الدياجينيز والاستحالة ليشترك في تكوين المياه الجوفية. وعادة تكون هذه المياه حارة ومعدنية. ويعتقد العلماء أن مصدر مياه البكر يأتي بمعظمه من الماء الخلالي.

## توزع المياه الجوفية

تبلغ نسبة المياه التي تتسرب في باطن الأرض نحو $\frac{1}{10}$ من كمية الأمطار التي تهطل على السطح. وهي تختلف حسب معدل الأمطار وطبيعة الصخور وشدة الانحدار، ففي المناطق التي يكون فيها معدل الأمطار معتدلاً، وتكون أراضيها خفيفة الانحدار تزداد نسبة المياه المرتشحة، وتصبح هذه النسبة أكبر حين تكون الصخور السطحية شديدة النفوذية، وبخاصة في حالة وجود غطاء نباتي.

تستمر المياه المتسربة في تعمقها تحت السطح حتى تصل إلى طبقات كتيمة، تؤدي إلى إيقافها وتجمعها، وتشكل طبقات حاملة للمياه aquifer layers. وبهذا يمكن أن يتحدد وجود المياه تحت السطح بالنطاقات التالية:

### ١ـ نطاق التهوية Aeration zone

وهو نطاق تحرك المياه، حيث تنتقل خلال فراغات وشقوق الصخور، وهي في طريقها إلى الطبقات الحاملة للماء. وتكون الفراغات مملوءة بالهواء والماء، ويمكن أن يقسم نطاق التهوية إلى ثلاثة أحزمة:

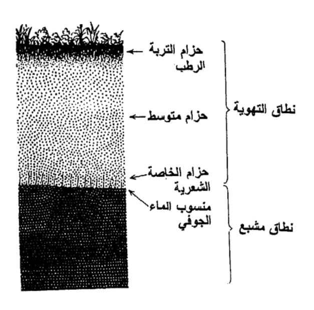
آ ـ حزام التربة الرطب، ب ـ حزام متوسط، حـ ـ حزام الخاصة الشعرية.

**آ ـ حزام التربة الرطب Soil moisture belt**: وهو يمتد من سطح الأرض إلى نهاية جذور النباتات. ويكون جزء من الماء المتسرب في هذا الحزام معلقاً بفعل قوى الجذب الجزيئي molecular attraction التي تمنعه من التحرك باتجاه الأعماق، حيث يشكل غشاء يغلف حبيبات التربة. يُستعمل بعض هذا الماء بوساطة النباتات، وبعضه الآخر يتبخر عائداً للغلاف الجوي، أما الجزء المتبقي من الماء وغير العالق،

فيستمر في تعمقه حتى يصل إلى الطبقة الحاملة للمـاء، الـتي تعـرف حدودهـا العليـا بمنسوب الماء الجوفي.

**ب ـ حزام متوسط Intermediate belt**: يوجـد أسـفل حـزام التربـة الرطـب وينعدم وجوده في المناطق الرطبة، التي يكون منسوب الماء فيهـا قريبـاً مـن السـطح، بينما تصل سماكته في المناطق الجافة إلى نحو (٥٠٠) متر. وتكون المياه في هذا المستوى إما معلقة بالجذب الجزيئي، أو من النوع المتحرك ليصل إلى الطبقة الحاملة للماء.

**حـ ـ حزام الخاصة الشعرية Capillary fringe belt**: يفصـل هـذا الحـزام بـين نطاق التهوية ونطاق التشبع. حيث يرتفع الماء في هذا الحزام في اتجاه معاكس للثقالة في مسارات شعرية دقيقة بـين حبيبـات التربـة أو الرسـوبات. وتختلـف سماكـة هـذا الحزام حسب طبيعة الرسوبات التي تتحرك فيها المياه، ففـي حالـة رسـوبات خشـنة تكون سماكته ضئيلة جداً بينما تصل إلى عدة أمتار في الرسوبات الناعمة (شكل ٤ـ١).



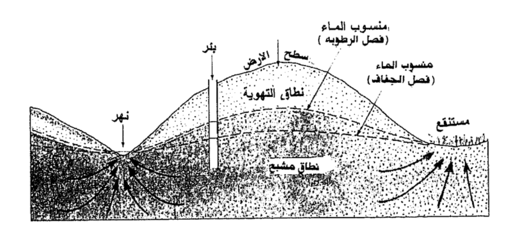

**شكل ٤ـ١: توزع المياه الجوفية.**

### ٢ـ نطاق متوسط Intermediate zone

ينحصر هذا النطاق بين أعلى منسوب تصل إليه المياه الجوفية بعد فترات الأمطار الغزيرة، وأدنى منسوب تهبط إليه في نهاية فترة الجفاف. وهذا يعني أنه إذا حفرت آبار في هذا النطاق فلا بد أن تكون موسمية وليست دائمة.

### ٣ـ نطاق التشبع Saturation zone

تكون الفراغات في هذا النطاق مملوءة بالماء الجوفي، حيث يمنع تسربها إلى باطن الأرض وجود طبقة كتيمة تحته. وعادة تكون الآبار التي تحفر في هذا النطاق دائمة التصريف (شكل ٤ـ٢). وسوف نركز في هذا الفصل على دراسة الماء الجوفي في هذا النطاق.




شكل ٤ـ٢: يوضح نطاقات المياه الجوفية في الأراضي المتجانسة.

## عمق المياه الجوفية

توجد المياه الجوفية على أعماق مختلفة تحت سطح الأرض ففي المناطق الرطبة توجد على عمق بضعة أمتار من السطح، بينما تكون في المناطق الصحراوية على

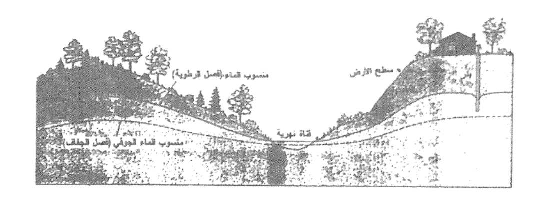
أعمق بضع مئات من الأمتار.

وبصورة عامة يوجد الماء الجوفي تحت سطح اليابسة في كل مكان تقريباً، إلا أن وجوده بكميات قابلة للاستثمار يعتمد على الصخور الحاملة له ونوعيتها، كما يعتمد على أنواع وكميات المواد المنحلة فيه، ولهذا السبب فإن بعض الأماكن تكون مناسبة أكثر من غيرها للحصول على إمداد مفيد من الماء الجوفي.

إن أكثر من نصف الماء الجوفي، بما فيه معظم الماء القابل للاستثمار موجود في أعماق تقرب من (٧٥٠) متراً من سطح الأرض. ويبلغ حجم الماء الجوفي في هذا النطاق العميق بما يعادل طبقة مائية تفرش جميع مساحات اليابسة في العالم بسماكة (٥٥) متراً. ثم يتناقص وجود الماء الجوفي بعد هذا العمق تدريجياً وبشكل غير نظامي. وقد عثر بعض علماء السوفيت على مياه جوفية على أعماق ٩,٤كم و١١كم. ولكن المياه في هذه الأعماق تكون واقعة تحت ضغوط عالية ناجمة من الغطاء الصخري، مما يؤدي إلى احتباس المياه في الفراغات الصخرية الصغيرة، ويصبح من الصعب الحصول عليها.

## منسوب الماء الجوفي Ground water table

توجد المياه الجوفية تحت سطح الأرض على مستوى معين يعرف بمنسوب الماء الجوفي، وهو السطح العلوي لنطاق التشبع. ويختلف عمق هذا المنسوب من مكان لآخر. فهو يكون قريباً من سطح الأرض في المناطق الرطبة غزيرة الأمطار، والقريبة من البحار والأنهار، بينما يكون بعيداً عن سطح الأرض في المناطق الجافة. ويساير منسوب الماء الجوفي السطح الطبوغرافي من حيث الارتفاع والانخفاض، إذ يتوازى مع السطح الطبوغرافي حين تكون الأراضي منبسطة، ويكون أقل مسايرة في المناطق ذات التضاريس الحادة (شكل ٤-٣).

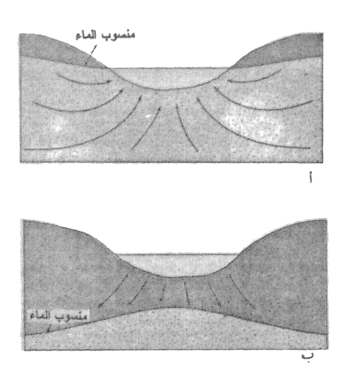



**شكل ٤-٣: مسايرة مستوى الماء الجوفي للسطح الطبوغرافي.**

**العوامل المؤثرة في منسوب الماء الجوفي:** تشترك عدة عوامل في جعل سطح منسوب الماء الجوفي غير منتظم، مثل الاختلاف في معدل الأمطار ونفوذية الصخور من مكان إلى آخر، حيث يؤدي ذلك إلى ارتشاح غير متساوٍ للماء، وبالتالي إلى اختلافات في مستوى الماء الجوفي. وعلى كل الأحوال فإن السبب المهم في عدم الانتظام هو تحرك المياه الجوفية ببطئ شديد، وبمعدلات متغيرة تحت شروط مختلفة. وبذلك تميل المياه الجوفية إلى التجمع تحت المناطق المرتفعة الواقعة بين الأودية النهرية. فإذا توقف هطول المطر كلياً فإن هذا الارتفاع في مستوى الماء سوف يهبط تدريجياً ليصل إلى مستوى الأودية، ولكن هذا لا يحدث لأن الامداد المطري الجديد وبشكل متكرر يحول دون ذلك.

كذلك وجود قناة نهرية فوق نطاق التشبع يؤثر في منسوب الماء الجوفي. ففي المناطق الرطبة غزيرة الأمطار يرتفع منسوب الماء، ويتقاطع مع القناة النهرية، ويتم امدادها وبشكل مستمر بالمياه الجوفية، وتعرف هذه الأنهار بالمتأثرة effluent streams. وبالمقابل ففي المناطق الجافة يكون منسوب الماء الجوفي بعيداً عن السطح، فإن الأنهار دائمة الجريان الآتية من المناطق الممطرة، عندما تعبر الصحاري فإن تفقد كميات من مياهها في تغذية نطاق التشبع الواقع تحتها، نتيجة تسربها إلى الأسفل،

مما يؤدي إلى تحدب في منسوب الماء نحو الأعلى تحت القناة النهرية. ويشار إليها في هذه الحالة بالأنهار المؤثرة influent streams (شكل ٤-٤).




**شكل ٤-٤: علاقة منسوب الماء الجوفي بالشروط المناخية.**

أ - في المناطق الرطبة ينحدر منسوب الماء الجوفي باتجاه النهر (نهر متأثر).

ب - في المناطق الجافة يرتفع منسوب الماء الجوفي تحت القناة النهرية (نهر مؤثر).

## المسامية والنفوذية

تكون معظم المياه الجوفية الموجودة على أعماق مختلفة من سطح الأرض في حركة مستمرة، وتقاس سرعة تحركها بالسنتميتر في اليوم، أو المتر في السنة. ولا بد لنا لفهم بطء حركة المياه الجوفية من دراسة الخواص الفيزيائية للصخور، وعلاقتها بحركة المياه

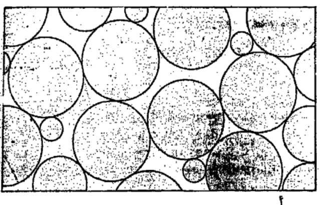
الجوفية.

تقسم الصخور اعتماداً على علاقاتها بحركة المياه الجوفية إلى نوعين رئيسين: النوع الأول يسمح بتسرب المياه عبر المسامات والفراغات، التي توجد بين الحبات المكونة للصخور، أو خلال الشقوق والفواصل الموجودة فيها، ويعرف هذا النوع بالصخور النفوذة كالصخور الرملية والحصوية قليلة التماسك، والصخور البلورية المشققة. أما النوع الثاني فلا يسمح بتسرب المياه ونفاذها إلى باطن الأرض. ويعرف بالصخور الكتيمة كالصخور الغضارية والصخور البلورية غير المشققة. ويجب هنا أن نميز ما بين مسامية الصخر ونفوذيته.

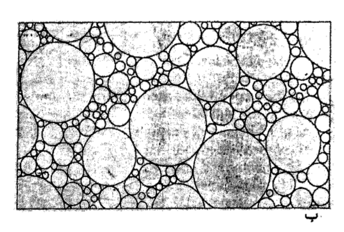
**المسامية porosity:** تعتمد كمية المياه المخزونة ضمن حجم معين من الصخر أو الرسوبات على المسامية. وتحسب المسامية بالنسبة المئوية لحجم الفراغات إلى الحجم الكلي للصخر أو الرسوبات الحاوية لها.

تختلف المسامية اختلافاً كبيراً حسب نوعية الصخور، حيث تتميز الصخور الرسوبية الحطامية عن غيرها من الصخور الرسوبية أو الصخور النارية بمساميتها العالية، إذ إن الحبات الحطامية حين تتراكم بالترسيب لا بد أن تترك بينها فراغات مسامية. وتعتمد المسامية فيها على شكل وحجم الحبات المكونة للصخور ودرجة تجانسها، كما تعتمد على طريقة ارتصافها.

تزداد المسامية مع تناقص حجم الحبيبات، إذ ترتفع المسامية إلى نحو ٥٤٪ في الرسوبات الغضارية، بينما تنخفض في الرسوبات الرملية الخشنة إلى نحو ٣٩٪. وكذلك التجانس الحجمي يرفع من درجة المسامية بينما تنخفض حين تكون الحبيبات متباينة في الحجم (شكل ٤-٥).



أ

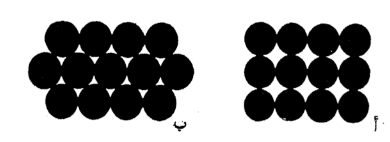



**شكل ٤-٥: رسم توضيحي يبين علاقة المسامية بالتجانس الحجمي (تُمثل الحبات الرسوبية بأشكال كروية)**

أ - المساميه ٣٢٪ في حالة تجانس حجم الحبات.

ب - المساميه ١٧٪ في حالة عدم تجانس حجم الحبات.

أما ارتصاف الحبات الحطامية إلى جانب بعضها بعضاً، فهو ذو تأثير في المسامية. ففي مجموعة من الحبات الكروية المتعادلة في الحجم يمكن للمسامية أن تتراوح بين ٢٦ - ٤٨٪، حسب النموذج الذي يتم فيه إرتصافها (شكل ٤-٦).

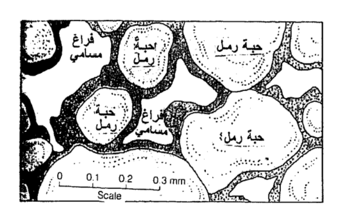



**شكل ٤-٦- رسم توضيحي يبين تأثير طريقة إرتصاف الحبات في المسامية.**

أ - الارتصاف القلق: تكون كل كرة على تماس مع ست كرات أخرى (في الأبعاد الثلاثة) وتكون المسامية ٤٧,٦٪.

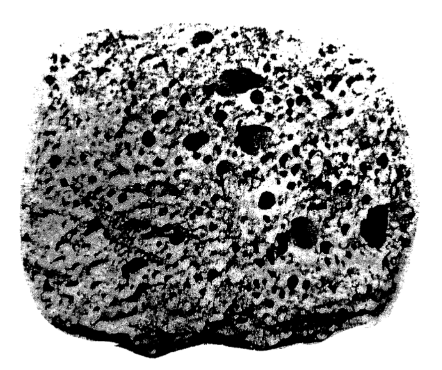
ب - الارتصاف المستقر: تكون كل كرة على تماس مع اثنتي عشرة كرة أخرى وتنخفض المسامية إلى ٢٦٪.

كذلك يؤثر شكل الحبات في المسامية. فالحبات جيدة التدوير تميل لأن ترتصف بفراغات دنيا أكثر من الحبات الزاوية. وبصورة عامة إن مسامية الرسوبات تنخفض بنسبة كبيرة إذا ما تماسكت بملاط ما شكل (٤-٧).




شكل ٤-٧: انخفاض المسامية بتماسك حبات الرمل بالملاط.

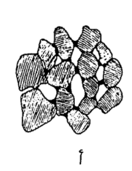
أما مسامية الصخور البركانية فترجع إلى انطلاق الغازات البركانية أثناء تصلب اللابات، حيث تخلف في الصخور الناتجة منها فراغات كروية، تختلف في حجمها وعددها من صخر لآخر، وتعرف بالمسامية الفقاعية vesicular porosity (شكل٤-٨). وبصورة عامة ترجع مسامية الصخور النارية إلى الشقوق والفواصل التي أوجدتها الحادثات التكتونية وهي مسامية الشقوق fracture porosity. ويضاف إلى ذلك تشكل المسامية في الصخور بعمليات الانحلال الكيميائي وتعرف بمسامية الانحلال solution porosity.



شكل ٤ـ٨: المسامية الفقاعية في صخر الخفان البركاني.

**النفوذية Permeability**: النفوذية هي قابلية الصخور على إمرار الموائع خلال الفراغات الموجودة فيها. ومن المحتمل أن يكون الصخر ذو المسامية المنخفضة ذا نفوذية منخفضة، ولكن ليس من الضروري أن تكون المسامية عالية حتى تكون النفوذية عالية. لأن النفوذية تعتمد على أبعاد الفراغات وحجومها واتصالها مع بعضها البعض، ويلعب الجذب الجزيئي molecular attraction دوراً مهماً في النفوذية. فالجذب الجزيئي هو القوة التي تجعل غشاوة مائية تلتصق بالسطح الصخري على الرغم من قوة الثقالة. ومثال ذلك إذا غطسنا الحصى في الماء ثم أخرجناه. فإذا كان الفراغ المسامي pore space بين حبتين متجاورتين صغيراً، فإن الغشاوتين المائيتين لهاتين الحبتين تلتصقان مع بعضهما بعضاً، وتمتد قوة التجاذب الجزيئي داخل الفراغ المسامي وتمنع الماء من الحركة (شكل ٤-٩).



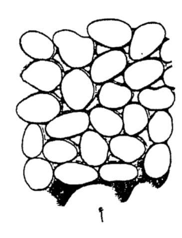




**شكل ٤ـ٩: يوضح الجذب الجزيئي.**

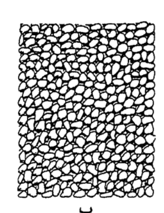
أ ـ الماء المعلق ما بين حبات رملية.

ب ـ الماء المعلق ما بين الإبهام والسبابة.

وهذا ما يحدث في الصخور الغضارية، فبالرغم من أنها ذات مسامية عالية لكنها غير نفوذة. وهذا بسبب كونها مؤلفة من فلزات مقاييس حبيباتها أقل من (٠,٠٠٥مم)، والفراغات المسامية بينها صغيرة جداً. وتكون المياه الموجودة ضمن المسامات مرتبطة فيزيائياً بشكل متين، بحيث لا تستطيع قوى الثقالة تحريكها، وبالتالي لا تستطيع المياه الحركة بين الفراغات. وبالمقابل فإن الرسوبات الرملية مؤلفة من حبات مقاييسها بين (٠,٠٦ ـ ٢مم)، وإن قطر الفراغات المسامية أكبر من سماكة الغشاوة المائية التي تغلف الحبات، لذلك لا تمتد قوة الجذب الجزيئي خارج نطاق الغشاوة، مما يسمح بتحرك الماء في مراكز هذه الفراغات بحرية تجاوباً للثقالة الأرضية. وكلما كانت أقطار الفراغات المسامية كبيرة ازدادت النفوذية، على أن تكون هذه الفراغات متصلة (شكل ٤ـ١٠).









**شكل ٤ـ١٠: تأثير الجذب الجزيئي في ماء الفراغات المسامية للرسوبات.**

أ ـ يرتشح الماء إلى الأسفل في الرسوبات الرملية، بالرغم من أن بعض الماء يبقى معلقاً بالجذب الجزيئي.

ب ـ يبقى الماء معلقاً في الفراغات المسامية في الرسوبات الناعمة. (مقياس الرسم أكبر بكثير من الحجم الطبيعي).

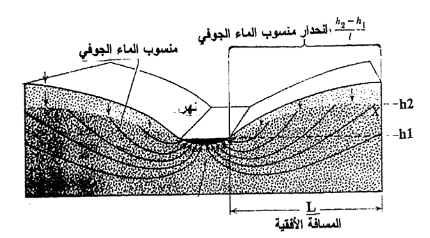
تكون الصخور النفوذة قابلة لحمل المياه الجوفية واختزانها، إذا كانت مرتكزة فوق طبقات كتيمة، لذلك تعرف بـالصخور الحاملة للمـاء aquifer rocks مثل الصخور الحطامية قليلة التماسك (صخـور حصويـة أو رمليـة) والصخـور الكلسـية المكرستة، والصخور النارية (غرانيت ـ بازلت ـ غابرو) المشققة.

## حركة المياه الجوفية:

تسمى حركة المياه الجوفية داخل نطاق التشبع الارتشاح percolation، إذ يتحرك الماء ببطء خلال فراغات مسامية صغيرة على امتداد ممرات خيطية الشكل ومتوازية. تعرف هذه الحركة بالتدفق الصفائحي laminar flow. حيث تكون الحركة في مراكز هذه الممرات سريعة، ثم تتناقص تدريجياً باتجاه جدران الفراغات، حتى تصل إلى الصفر بسبب قوى الجذب الجزيئي.

تستمد الطاقة التي تسبب ارتشاح المياه الجوفية من قوة الثقالة الأرضية، ويكـون

رد فعل لهذه القوة ارتشاح المياه من أماكن ذات منسوب مائي عالٍ إلى أماكن ذات منسوب مائي منخفض، في اتجاه مجرى مائي أو بحيرة أو ينبوع (شكل ٤ـ١١).




**شكل ٤ـ١١: حركة المياه الجوفية في الصخور النفوذة.**

يلاحظ من الشكل أن بعض الماء الجوفي يجري مباشرة باتجاه أسفل منحدر المنسوب المائي بأقصر طريق ممكن. غير أن معظم الماء يجري على امتداد ممرات عديدة ومنحنية متجهة نحو الأعماق. ويتحول بعض هذه الممرات العميقة نحو الأعلى باتجاه عكس الثقالة الأرضية، وينفذ الماء إلى المجرى المائي من كل الاتجاهات بما فيها الاتجاه الشاقولي ويحدث هذا لأن المياه الجوفية في أسفل المرتفعات تكون واقعة تحت ضغوط أعلى مما عليه تحت المجرى المائي أو البحيرة، مما يدفعها للتحرك تجاه منطقة الضغط المنخفض.

وهكذا فإن القوة التي تسبب حركة الماء الجوفي منسوبة للثقالة الأرضية، التي تسحب الماء باتجاه الأسفل، ثم ينحرف جانبياً في اتجاه نقطة التصريف (نهراً ـ بحيرة ـ ينبوعاً) التي تكون على منحدر. يسمى انحدار منسوب الماء الجوفي التحدّر المائي ( $I$ ) hydraulic gradient. ويحسب بقسمة البعد الرأسي ($h$) بين نقطة التدفق ونقطة التصريف على المسافة الأفقية بين النقطتين ( $L$ ) أي:

$$I = \frac{h}{L}$$

ففي عام ١٨٥٦ افترض مهندس فرنسي يدعى هنري دارسي Henri Darcy صيغة، يمكن أن تستعمل للتعبير عن معدل سرعة جريان الماء الجوفي عبر الصخور، وتعرف الآن بقانون دارسي ويعبر عنها بالمعادلة التالية:

$$V = p.\frac{h}{L} = p.I$$

حيث تمثل ( $V$ ) السرعة و ( $p$ ) عامل النفوذية. وقد وجد دارسي أن سرعة الماء الجوفي تزداد بازدياد التحدر المائي إذا ما ثبت عامل النفوذية.

ونظراً لكمية الاحتكاك الكبيرة التي تؤثر في ارتشاح المياه، فإن معدل سرعة تدفق الماء الجوفي يكون منخفضاً، ويتراوح عادة ما بين بضعة سنتمترات في اليوم إلى نحو (١٥) متراً في السنة. وقد تم قياس أكبر معدل لحركة الماء الجوفي في الولايات المتحدة، فكان (٢٥٠) متراً في السنة في صخور ذات نفوذية عالية جداً.

وقد أجري حساب لمعدل سرعة الماء الجوفي المرتشح ما بين أزواج من الآبار بطرائق مباشرة عديدة، نذكر منها الطريقة التي تعتمد على الناقلية الكهربائية. وتتضمن الوصل بين بئرين متجاورتين مكسوتين من داخلهما بمعدن ليشكلا دارة كهربائية، وقد أضيفت إلى مياه البئر عالية المنسوب مركبات كيميائية ذات ناقلية فعالة، وعند وصول هذه المركبات إلى البئر الثانية ذات المنسوب المنخفض، تشكلت دارة مغلقة بين البئرين التي سجلت تغيراتها بوساطة مقياس الكمون. وبتقسيم المسافة بين البئرين على الفترة الزمنية، التي استغرقتها المركبات الكيميائية للوصول إلى البئر الثانية، تحدد سرعة تدفق الماء الجوفي. وقد استعملت في طريقة أخرى مواد ملونة، التي تضاف إلى احدى الآبار، ثم يحسب الزمن اللازم لانتقالها إلى بئر أخرى مجاورة تقع على بعد معلوم.

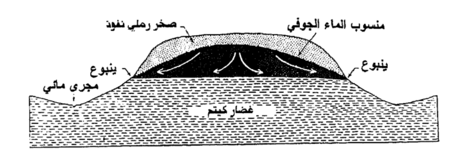
وقد بينت القياسات، التي سجلت في عدد كبير من التجارب، بأن سرعة تدفق الماء الجوفي في الطبقات الحاملة للماء ليست أكثر من (١,٥) متراً في اليوم، ولا أقل من (١,٥) متراً في السنة.

## الينابيع

وهي الفتحات التي يتدفق منها الماء الجوفي بشكل طبيعي على سطح الأرض. وإن أبسط أنواع الينابيع هي التي تتدفق مياهها بالثقالة الأرضية وتدعى ينابيع الثقالة gravity springs. وهي ناجمة من تقاطع منسوب الماء الجوفي مع سطح الأرض. ويتحكم في موضع الينبوع، التغيّر الرأسي أو الأفقي في نفوذية الصخور. فإذا كانت طبقات رملية مسامية تقع فوق طبقة كتيمة، فإن الماء المرتشح داخل الطبقات الرملية، سوف يتحرك جانبياً حين اصطدامه بالطبقة الكتيمة، وقد ينبثق على شكل ينبوع حين يوجد تماس ستراتيغرافي متكشف على سطح الأرض على امتداد جانب من وادٍ أو جرفٍ شاطئي. وقد تكون الينابيع متقطعة أو دائمة التدفق، وذلك حسب الفصول ومعدل الأمطار من جهة، والشروط تحت سطح الأرض من جهة ثانية.

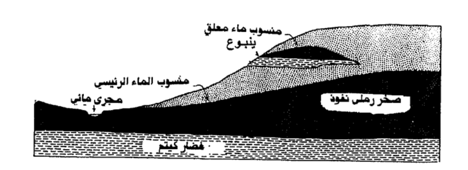
**الشروط الجيولوجية لتشكل الينابيع:** تتشكل الينابيع في شروط جيولوجية يمكن إيجازها بما يلي:

١ـ عندما تكون هضبة مؤلفة من صخور نفوذة وتحوي في أسفلها على طبقة كتيمة أفقية، يتشكل الينبوع عندما يتقاطع منسوب الماء مع المنحدر (شكل٤ـ١٢).




شكل ٤ـ١٢: تشكل الينبوع عند تقاطع منسوب الماء الجوفي مع سطح منحدر.

٢ـ عندما توجد طبقة كتيمة فوق منسوب الماء الجوفي، فإن جزءاً من الماء المتسرب من السطح إلى باطن الأرض تعاق حركته بهذه الطبقة، مما يؤدي إلى تجمع الماء الجوفي فوقها ويشكل نطاقاً مشبعاً في نطاق التهوية. ويكون مستوى الماء في هذا النطاق أعلى من منسوب الماء الجوفي في المنطقة، لذلك يدعى المنسوب المائي المعلق perched water table ومن الممكن أن ينبثق الماء الجوفي المعلق على سطح الأرض على شكل ينبوع كما هو واضح (الشكل ٤ـ١٢).




شكل ٤ـ١٣: تقاطع منسوب الماء المعلق مع سطح المنحدر يؤدي إلى تدفق ينبوع.

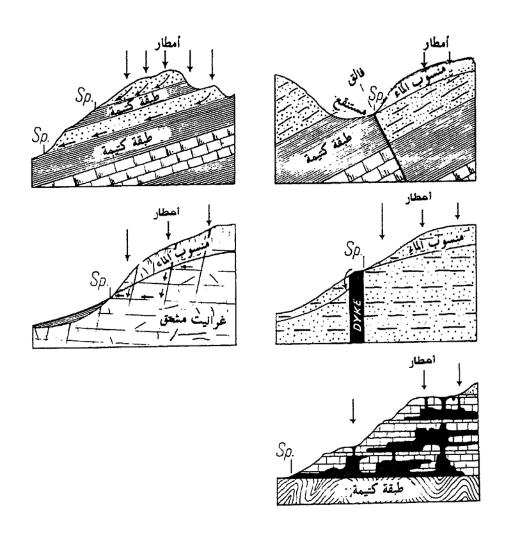
٣ـ عندما تتبع المياه الجوفية في حركتها ميل طبقة كتيمة، فإن هذه المياه تتدفق على شكل ينبوع في أسفل المنحدر عند حافة هذه الطبقة (شكل ٤ـ١٤أ).

٤ـ إذا تأثرت الطبقة الحاملة للماء بفالق يجعل الطبقة الكتيمة إلى جانب الطبقة المنفذة، وتعمل على حجز المياه ورفع منسوبها. تتدفق الينابيع عند تقاطع الفالق مع منسوب الماء الجوفي (شكل ٤ـ١٤ب).

٥ـ تتجمع المياه الجوفية في الصخور النارية على طول الشقوق الموجودة فيها، وتخرج إلى السطح على شكل ينبوع في أسفل المنحدر تحت غطاء من اللحقيات (شكل ٤ـ١٤حـ).

٦ـ يعمل القاطع الناري dyke دور سد في طريق حركة المياه الجوفية مما يؤدي إلى تجمعها خلفه، وتدفقها على شكل ينبوع، عند تقاطع منسوب الماء الجوفي مع تكشف القاطع (شكل ٤ـ١٤د).

٧ـ تتسرب مياه الأمطار خلال شقوق وفواصل الصخور الكلسية. ثم لا تلبث الشقوق والفواصل أن تتسع بالحت الكارستي وتتشكل الكهوف والمغاور والمجاري الجوفية، فعندما تصل إلى طبقات كتيمة تخرج على شكل ينبوع عند أسفل المنحدر (شكل ٤ـ١٤هـ).




شكل ٤ـ١٤: يوضح الشروط الجيولوجية لتشكل الينابيع.

وقد يتعقد سير المياه داخل الصخور الكلسية بوجود بعض ظاهرات الحت الكارستي كالمصات، التي تعطي ينابيع متقطعة بالرغم من أن التغذية مستمرة، ومثالها نبع الفوار في وادي النضارة (الطرف الجنوبي لسلسلة الجبال الساحلية).

تبدي معظم الينابيع تغيرات في معدل التدفق. فبعضها له تغيرات موسمية حسب معدلات الأمطار، وبعضها له تغيرات يومية حسب استهلاك النباتات للماء الجوفي، حيث يكون التدفق أعظمياً ما بين منتصف الليل إلى شروق الشمس، ثم يتناقص تدريجياً وبشكل ثابت مع ازدياد استهلاك النباتات للماء خلال ساعات النهار.

**الينابيع الحارة Hot springs**: تعرف الينابيع التي تنبثق منها مياهاً ساخنة أو حارة على سطح الأرض بالينابيع الحارة. وتعد الينابيع حارة إذا كانت درجة حرارتها أعلى بـ (٦°-٩°) مئوية من حرارة الهواء الجوي في منطقة وجودها. وهي كثيرة الانتشار في مناطق مختلفة من العالم، وبخاصة في المناطق الجبلية الغربية للولايات المتحدة، ويرجع ارتفاع درجة حرارة بعضها إلى تدرج الحرارة الأرضية، إذ إن المياه السطحية المتسربة إلى ما تحت السطح ترتفع درجة حرارتها بازدياد العمق بمعدل (٣٠°) مئوية في كل كيلومتر. غير أن نحو ٩٥٪ من ينابيع الولايات المتحدة تستمد حرارتها من تبرد كتل الماغما التي اندست في صخور القشرة الأرضية.

تكون مياه الينابيع الحارة معدنية أكثر من غيرها. ويرجع هذا إلى كون قدرة المياه الحارة على إذابة المواد المؤلفة للصخور أكثر منها في المياه الباردة. فإذا اخترقت هذه المياه صخوراً كلسية فإنها تذيب قسماً كبيراً منها مشكلة مياهاً كلسية. أما إذا اخترقت طبقات تحتوي على مركبات حديدية أو كبريتية فتصبح مياه حديدية أو كبريتية. ولهذا نجد أن معظم الينابيع الحارة تكون كبريتية أو سيليسية أو كلسية، وقد يحتوي بعضها على أملاح الكلور والمغنيزيوم.

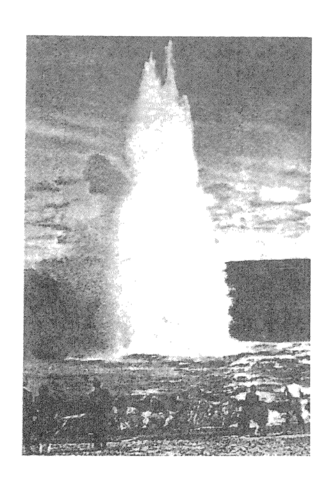
**الجيزرات Geysers**[1]: الجيزرات هي ينابيع حارة فوارة ومتقطعة، يندفع منها بقوة أعمدة من الماء والبخار الحار، قد يصل ارتفاعها في بعض الحالات إلى أكثر

---

[1] أتت التسمية من كلمة Geysir وهو اسم ايسلندي ويعني التفجر.

من (١٠٠) متر. أشهرها موجودة في ثلاث مناطق بركانية وهي: جيزرات الحديقة الوطنية في منطقة اليلوستون Yellowstone في الولايات المتحدة، وفي شمال جزيرة نيوزلندا وفي أيسلندا.

إن أكبر الجيزرات المعروفة موجود في أيسلندا، حيث يظهر على شكل رابية ناجمة من توضعات المياه الحارة، تحيط بحوض دائري قطره (٢١) متراً وعمقه (١,٢) متراً مملوءاً بالمياه السيليسية، التي تتراوح درجة حرارتها بين (٧٥°ـ٩٠°) مئوية. ويتصل الحوض بمدخنة عمقها نحو (٣٠) متراً، يمر منها الماء المندفع من الأعماق إلى السطح (شكل ٤ـ١٥).



**شكل ٤ـ١٥: اندفاع مياه الجيزر في أيسلندا.**

بالرغم من أننا لا نستطيع أن نلاحظ ونـدرس ممرات المياه الجوفية التي تزود الجيزرات. إلا أنـه مـن المعروف أن المياه الجوية المتسربة إلى الأعماق تتجمع في تجاويف وممرات شاقولية تصل إلى سطح الأرض، وإن الدسيسات النارية الحارة أو الغازات المنبعثة منها ترفع درجة حرارتها إلى أعلى من درجة الغليان، وتكون درجة غليان المياه السفلية أعلى من (١٠٠°) مئوية بسبب ضغط المياه العلوية. وبنتيجة التسخين يتمدد الماء ومن ثم ينساب على السطح، وهذا يؤدي إلى انخفاض الضغط على المياه السفلية وحدوث الغليان، فتتجمع الغازات وبخار الماء الناجم عن التكاثف على سطح المياه، بسبب خفة وزنها، وتؤدي إلى قوى دفع كبيرة ترفع كتلة الماء إلى السطح على هيئة بخار، مما يتسبب في فورانها وتفجرها. ويرافق اندفاع بخار الماء كمية كبيرة من الغازات. وبعد ذلك تحتاج التجاويف المائية الجوفية إلى فترة معينة من الزمن لتملأ ثانية، وهكذا تعاود الاندفاعات نشاطها في فترات متقطعة (شكل ٤-١٦).

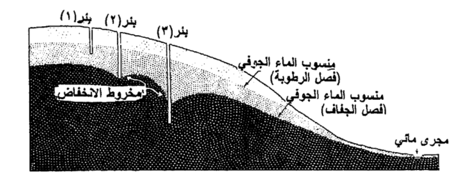
## الآبار:

عرفنا الينابيع بأنها نتيجة طبيعية لتقاطع منسوب الماء الجوفي مع سطح الأرض على أحد المنحدرات. أما الآبار فهي فتحات اصطناعية يتم حفرها ابتداءً من سطح الأرض إلى نطاق التشبع.

يختلف مستوى منسوب الماء الجوفي في الآبار باختلاف الفصول، فيرتفع في فصول الأمطار وينخفض في فترات الجفاف. ولهذا يفضل أن تكون نهاية الحفر تحت منسوب الماء الجوفي لتضمن إستمرار انتاج الماء.

حين تضخ المياه الجوفية من بئر ما، فإن منسوب الماء الجوفي ينخفض حول البئر ويشكل منحدراً مركزه البئر، لأن مقدار الماء المسحوب من البئر أكبر من مقدار الماء الآتي إليه، وكنتيجة لذلك يأخذ منسوب الماء شكل مخروط مقلوب يدعى بمخروط الانخفاض cone of depression (شكل ٤-١٧). وبما أن مخروط الانخفاض يزيد من التحدر المائي بالقرب من البئر، فإن المياه تتدفق بسرعة أكبر نحو فتحة البئر. فإذا توقف الضخ بعد فترة قصيرة فإن منسوب الماء الجوفي يعود إلى

وضعه الأصلي. أما إذا استمر الضخ بشكل متواصل ولفترات طويلـة، فـإن مخـروط الانخفاض يتسع جانبياً لمسافات طويلة، وينخفض منسوب الماء في المنطقة، وتصبـح عودته إلى مستواه الطبيعي بحاجة لفترة طويلة، ويمكن أن يسبب ذلك جفاف الآبـار الضحلة المجاورة. ويحدث ذلك أيضاً نتيجـة الضـخ الجـائر مـن عـدة آبـار متقاربـة، فيتشكل حولها عدد من مخاريط الانخفاض المتداخلة، وينخفض منسوب الماء الجـوفي بسرعة ملحوظة. وهذا يتطلب منا مراقبة وتنظيم الضخ من الآبـار، وتحديـد الأبعـاد ما بين الآبار، ليتسنى لنا الاستفادة من المياه الجوفية على الوجه الصحيح.

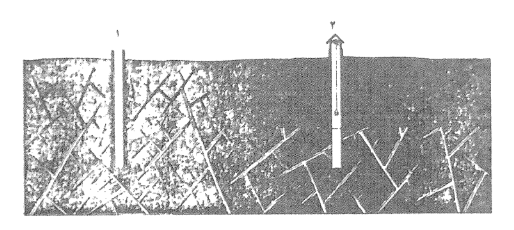



**شكل ٤ـ١٧: تشكل مخروط الانخفاض حين ضخ المياه الجوفية.**

إن حفر الآبار المنتجة للمياه تمثل مشكلة معروفة في المناطق التي تعتمد على المياه الجوفية. فقد تكون حفرة بئرية منتجة على عمق نحو (١٠) أمتـار، بينمـا تكـون في بئر مجاورة غير منتجة على العمق نفسه. ويمكن تعليل ذلك بأن الحفر في البئر الأولى قد وصل إلى مياه جوفية معلقـة، بينمـا الحفـر في البـئر الثانيـة قـد وصـل إلى نطـاق التهوية فقط، ويحتاج ذلـك إلى حفـر أعمـق حتـى يصـل إلى منسـوب المـاء الجـوفي الرئيس كما هو واضح في الشكل (٤ـ١٣).

وتصادف أحياناً الصعوبات نفسها عند حفر الآبار في الصخور البلوريـة. إذ إن

وجود الماء فيها يكون محصوراً في الشقوق. وإن حفر الآبار في مثل هذه الأراضي بعتمد على الصدفة في اختراق شبكة كافية من التشققات الصخرية (شكل ٤ـ١٨). ويمكن أن يؤدي الحفر العميق في هذه الصخور إلى بئر غير منتجة، لأن حجم الشقوق وعددها يتناقص مع العمق.




**شكل ٤ـ ١٨: رسم توضيحي يبين المياه الجوفية في الصخور البلورية.**

البئر (١) غير منتجة بينما تكون البئر (٢) منتجة للماء بسبب إختراق الحفر شبكة من الشقوق.

عندما تحفر الآبار في الأراضي الكلسية، حيث توجد المياه ضمن جيوب وممرات كبيرة، فهي تعطي كميات ضخمة من المياه، ويحتمل أن تنقطع من وقت لآخر، وذلك بسبب حركة المياه السريعة ضمن الجيوب.

**حساب تصريف Discharge الآبار**: يعرف تصريف البئر بكمية المياه المتدفقة من خلال مقطع عرضي في واحدة الزمن، وتحدد بمساحة المقطع العرضي وسرعة تدفق الماء فيكون:

$$V=\frac{Q}{A} \quad \text{أو} \quad Q=V.A$$

حيث: $V$ سرعة تدفق الماء.

$Q$ كمية المياه المتدفقة في واحدة الزمن.

$A$ مساحة المقطع العرضي الذي يمر خلاله الماء.

وبتطبيق قانون دارسي:

$$V = p.I \quad \text{يكون}$$

$$Q = p.I.A \quad \text{أي} \quad V = p.I = \frac{Q}{A}$$

وبهذا نستطيع أن نحسب تصريف بئر ما، إذا عرفنا عامل النفوذية ($p$)، والتحدر المائي ($I$) ومساحة المقطع العرضي ($A$).

**الآبار الارتوازية Artesian wells**[1]: لقد استعمل كثير من الناس خطأ مصطلح الآبار الارتوازية للدلالة على الآبار العميقة. ويعتقد آخرون بأن الماء في البئر الارتوازية يجب أن يتدفق على السطح. ومع أن المعنى الثاني أكثر صحة من الأول، إلا أنه يمثل تعريفاً ضيقاً جداً. إذ أن مصطلح ارتوازي يمكن استعماله لكل حالة يرتفع فيها الماء الجوفي الواقع تحت ضغط أعلى من الضغط الجوي ليصل إلى فوق منسوب الماء الجوفي في الطبقة الحاملة للماء. وحيث يوجد نظام ارتوازي يجب أن تتوافر الشروط التالية:

١ـ أن تقع الطبقة الحاملة للماء (أو الخازنة للماء) بين طبقتين كتيمتين ضمن طية التوائية مقعرة، بحيث لا تسمح بحركة الماء إلى الأعلى أو الأسفل.

٢ـ أن يكون للطبقة الحاملة للماء تكشف مرتفع ليوفر ضغطاً كبيراً عند حفر البئر.

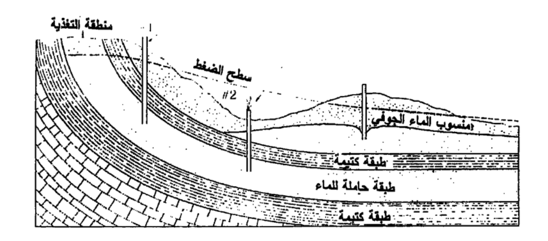
٣ـ توافر تغذية مستمرة بحيث تساعد على الامداد بالمياه الكافية.

٤ـ أن يبقى الماء محفوظاً في الطبقة الحاملة للماء، وأن لا يخرج إلا عن طريق البئر الارتوازية (شكل ٤ـ١٩).

---

(١) سميت بالارتوازية نسبة إلى بلدة Artois في فرنسا.

فإذا حُفرت بئر في وسط انحناء المقعر، فإن الماء في هذه الحالة يصعد إلى سطح الأرض بقوة هيدروستاتيكية hydrostatic، لكي تعادل منسوب الماء في الجزء المرتفع من الطبقة الحاملة للماء (منطقة التغذية recharge area). ولكن منسوب الماء في البئر المحفورة يرتفع إلى مستوى أقل من مستوى منطقة التغذية، بسبب قوة الاحتكاك عبر الطبقة الحاملة للماء، وفي هذا المستوى يتعادل الضغط الهيدروستاتيكي مع الضغط الجوي ويعرف بسطح الضغط pressure surface. وبصورة عامة كلما ازدادت المسافة من منطقة التغذية قل ارتفاع الماء. ففي الشكل (٤-١٩) فإن البئر (١) هي بئر ارتوازية غير متدفقة لأن سطح الضغط تحت سطح الأرض، بينما في البئر (٢) هي بئر ارتوازية متدفقة لأن سطح الضغط فوق سطح الأرض. ويجب أن نذكر هنا أن مصطلح ارتوازي لا يستعمل فقط للآبار، وإنما يستعمل أيضاً للينابيع التي تندفع مياهها عبر التشققات الصخرية بدل ارتفاعها داخل البئر.




**شكل ٤-١٩: يوضح شروط تشكل الآبار الارتوازية.**

بئر (١) بئر ارتوازية غير متدفقة ويجب ضخ الماء.

بئر (٢) بئر ارتوازية متدفقة. بئر (٣) بئر غير ارتوازية ويجب ضخ الماء.

## النشاط الجيولوجي للمياه الجوفية

يشمل النشاط الجيولوجي للمياه الجوفية عمليات الانحلال والترسيب:

### ١- الانحلال Dissolution

تبدأ المياه المتغلغلة في باطن الأرض بالتفاعل مع فلزات الريغوليت وتجويتها كيميائياً، مما يؤدي إلى زوال بعض الفلزات أو الصخور بعملية الانحلال. وتنتقل المواد المنحلة بفعل المياه إلى مخزون الماء الجوفي، التي يمكن أن تنبثق على السطح وتجري في الأقنية النهرية، ومنها إلى البحار حيث تنضم فيها إلى المواد المنحلة الأخرى، وتساهم في بناء الرسوبات البحرية.

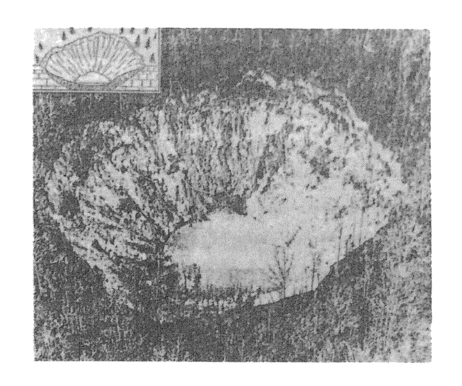
تكون الصخور الكربوناتية أكثر الصخور تجاوباً مع الانحلال. ويمكن قياس معدلات انحلالها عن طريق تثبيت أقراص من الحجر الكلسي حدد وزنها بدقة، في أماكن محددة تتوزع في مناطق مختلفة خلال فترة زمنية معينة، ثم حساب معدل خسارتها الوزنية بالنسبة إلى الزمن. كما يمكن حساب هذا المعدل بقياس مقدار انخفاض سطح صخر معرض للتجوية خلال فترة زمنية معينة. فقد لوحظ أن هذا المعدل في المناطق غزيرة الأمطار، والتي يرتفع منسوب الماء الجوفي نحو سطح الأرض، ويكون الغطاء النباتي فيها كثيفاً، يصل إلى (١٠) ميليمترات كل ألف سنة. كما أجريت ملاحظات أخرى على شواهد القبور في إحدى الكنائس في إنكلترا، التي كانت من الحجر الكلسي الحاوي على مستحاثات زنابق البحر، تعتمد على حساب مقدار بروز هذه المستحاثات عن سطح الحجر الكلسي نتيجة الانحلال. ووجد أن معدل تآكل الحجر الكلسي بالانحلال كان (٢,٥) ميليمتراً بعد مضي (٥٠) سنة أي (٥٠) ميليمتراً في كل ألف سنة. وتستخدم في الوقت الحالي وسائل قياس أكثر دقة قد تصل إلى (٠,٠٠٥) من الميليمتر من أجل تقدير معدلات انحلال الصخور الكربوناتية يؤخذ فيها في الحسبان الحت الميكانيكي لسطوح هذه الصخور.

**المحتوى الكيميائي للمياه الجوفية:** لقد وجد من خلال التحاليل التي أجريت على مياه الآبار والينابيع، أن المواد المنحلة الرئيسة الموجودة في المياه الجوفية هي: كلوريدات وسلفات وبيكاربونات الكلسيوم والمغنيزيوم والبوتاسيوم والصوديوم والحديد. ومن تحديد أنواع هذه المواد المنحلة يمكن استنتاج أنواع الفلزات الرئيسة المكونة للصخور التي اشتقت منها هذه المواد، لذلك يمكن القول إن المحتوى الكيميائي للمياه الجوفية يكون حسب أنواع الصخور التي كانت على تماس معها. ويصبح الماء الجوفي ماءاً عسراً hard water حين يرتفع محتواه بمركبات الكالسيوم والمغنيزيوم، ويعود ذلك إلى كون الصخور التي كانت على تماس معه كلسية دولوميتية. ويزداد تركيز السلفات والكلوريدات في المياه الجوفية التي توجد في مناطق جافة، حيث تكون عمليات التبخر شديدة، وتؤدي إلى ترسيب كميات كبيرة من كبريتات الكلسيوم وكربونات الكلسيوم، وأيضاً كلور الصوديوم في النطاق غير المشبع. وتكون الترب فيها قلوية alkali soils غير صالحة للزراعة، وبالتالي تكون مياهها الجوفية عسرة غير صالحة للشرب أو الاستهلاك البشري.

وقد تتحول المياه الجوفية العذبة في المناطق الشاطئية إلى مياه مالحة، نتيجة زيادة ضخها واستهلاكها، وتحرك المياه البحرية المالحة نحو اليابسة (شكل ٤-٢٧).

## الأشكال الناجمة من عمليات الإنحلال

**أ ـ البالوعات أو الحفر الغائرة sinkholes:** وهي تجاويف انحلال في الصخور الكربوناتية مفتوحة على سطح الأرض، ويطلق عليها اسم الدولينات Dolines. وهي من أكثر الظاهرات الجيومورفولوجية شيوعاً وانتشاراً، وتوجد بأعداد كبيرة في الأراضي الكلسية. وتأخذ معظمها شكل القمع، بحيث تصل إلى أقصى اتساع لها عند سطح الأرض، وتزداد ضيقاً كلما غارت وتعمقت فيها. وقد يظهر منسوب الماء الجوفي في أعماق بعض البالوعات (شكل ٤-٢٠).



**شكل ٤-٢٠: بالوعة قطرها ١٣٠ متراً وعمقها ٤٥ متراً، تشكلت من انهيار سقف مغارة كلسية. وإن أنقاض السقف المنهار شكّل تالوساً أخفى تكشف الصخر الأم، ويظهر منسوب الماء الجوفي في قاعها.**

تتكون البالوعات عادة بإحدى طريقتين: فبعضها يتطور تدريجياً مع مرور الزمن دون تأثير في وضع الصخور، ففي هذه الحالة تنحل الصخور الكلسية الواقعة مباشرة تحت التربة بتغلغل المياه المشبعة بغاز ($CO_2$) عبر الشقوق والفواصل الموجودة فيها، التي تؤدي إلى حل جدرانها الصخرية وتوسيعها تدريجياً، وتكون أماكن تقاطع الشقوق والفواصل مناسبة لتشكل البالوعات، لأن حركة المياه السطحية المتغلغلة فيها تكون سهلة وسريعة. ويعرف هذا النوع ببالوعات الانحلال solution sinkholes، حيث تتميز بضحالتها وقلة انحدار جوانبها. وبالمقابل يمكن

أن تتكون البالوعات فجأة نتيجة انهيار سقوف التجاويف الكهفية وتعرف بالوعات الانهيار collapse sinkholes، التي تتميز بأنها شديدة العمق وذات جوانب شديدة الانحدار كما هو واضح في الشكل (٤ـ٢٠). ويعتقد أن تشكل هذا النوع من البالوعات يعود إلى انخفاض منسوب الماء الجوفي في بعض المناطق، التي تنتشر فيها الصخور الكلسية الحاوية على كثير من التجاويف الكهفية، وزوال دعمه لها مما يؤدي إلى انهيار سقوفها، وتشكل الكثير من البالوعات الانهيارية.

يندمج أحياناً عدد من البالوعات المتجاورة بنتيجة توسعها، ويتشكل منها منخفض كبير يعرف البالوعة المركبة compound sinkhole. وتتميز المناطق التي تنتشر فيها البالوعات بغياب نظام صرف مائي على السطح. وذلك لأن المجاري المائية تشق لنفسها مجاري جوفية ذات سقوف، عن طريق جريان مياهها عبر هذه البالوعات. وقد تنهار أحياناً بعض أجزاء سقوف هذه المجاري وتشكل ما يسمى نوافذ الكارست Karst windows، وتعرف الفتحات الكبيرة منها بالأوفالا Uvala [1].

ويوجد أيضاً نوع من البالوعات يعرف بالبولييه Polye[1]. وهي أحواض طولانية تتميز بأن أرضها مسطحة، وتحيط بها حوائط مرتفعة من كل جهاتها، وتتكون في المناطق التي تعرضت للهبوط، سواء بحركات من الإلتواء أو الإنكسار وكثيراً ما تصل مساحة بعض أحواض البولييه إلى بضع عشرات من الكيلومترات المربعة.

**ب ـ كهوف الانحلال**: تتألف الصخور الكلسية والدولوميتية من فلزين رئيسين هما الكالسيت والدولوميت. وهي تغطي ملايين الكيلومترات المربعة من سطح اليابسة. ومع أن هذين الفلزين غير قابلين للانحلال في الماء النقي إلا أنهما ينحلان بسهولة في الماء الحامل لثنائي أوكسيد الكربون. وحين يتغلغل الماء السطحي داخل الأرض ينضم إلى المياه الجوفية، ويتفاعل مع الصخور الكربوناتية وغيرها من

---

[1] الدولين والأوفالا والبولييه تسميات يوغسلافية.

الصخور ويصبح مشحوناً بأيونات الكلسيوم وغيرها من القلويات، وبأيونات البيكربونات حسب التفاعل التالي:

$$H2CO3 = H^{+1} + HCO3^{-1}$$

حمض الكربون　　　　أيون بيكربونات

ويهاجم أيون الهيدروجين فلز الكالسيت، وينتج من ذلك أيون البيكربونات وأيون الكالسيوم:

$$CaCO3 + H^{+1} = HCO3^{-1} + Ca^{+2}$$

إن هذا الانحلال مثال على فعل التجوية الكيميائية، مثل فعلها في تفكك فلزات الصخور السيليكاتية. وفي كلتا الحالتين يهاجم حمض الكربون هذه الصخور على امتداد تماسه مع سطوحه في الفواصل والشقوق، وغيرها من الفتحات الصخرية. فالغرانيت مثلاً تزول منه العناصر القلوية ليبقى منه مواد غضارية، بالاضافة إلى الفلزات المقاومة للفعل الكيميائي، مثل الكوارتز وغيره. أما الصخور الكربوناتية فتزول مادتها بشكل تدريجي، مما يؤدي إلى توسع الشقوق والفواصل وتشكل تجاويف يزداد حجمها تدريجياً، وعندما يصل التجويف إلى حجم يستطيع الإنسان الدخول فيه فإنه يسمى الكهف Cave، ويطلق اسم المغارة Cavern على الكهف الكبير جداً، أو على مجموعة من الكهوف المتصل بعضها ببعض. ومع أن معظم الكهوف المتشكلة في الصخور الكربوناتية صغيرة الحجم، إلا أن بعضاً منها يأخذ حجوماً كبيرة. وعلى سبيل المثال نذكر مغارة كارلسباد Carlsbad Cavern في الجنوب الشرقي من ولاية نيومكسيكو، التي تشمل حجرة كبيرة يبلغ طولها (١٢٢٠) متراً وعرضها (١٩٠) متراً وارتفاع سقفها (١٠٠) متر.

## طبوغرافيا الكارست Karst topography

أتت كلمة كارست من إقليم كارست بيوغوسلافيا. إذ يتميز هذا الاقليم بمجموعة من الظاهرات الجيومورفولوجية، التي ترتبط كلها بما ينجم من عمليات الانحلال بفعل المياه الجوفية. وتتمثل طبوغرافية الكارست بأشكال سطحية ناجمة

من تكشف وانهيـار التحاويف الكهفية المترافقة مع تشكل البالوعات، وتتميز بوجود الكثير من الأحواض الصغيرة المغلقة. وتكون شبكة التصريف في هذا النوع من الأراضي غير نظامية، تختفي فيها المجاري المائية والأنهار بشكل فجائي وسريع، بسبب حدوث تصريف سريع لمياهها في باطن الأرض.

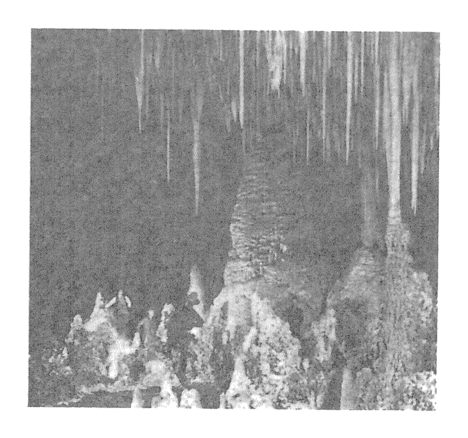
تساهم في تشكل الطبوغرافيا الكارستية عدة عوامل أهمها: توافر أمطار ومياه جارية غزيرة على سطح الأرض، وتوافر تربة فوق الصخور الكلسية، التي تساعد على توليد المزيد من ثنائي أوكسيد الكربون، وقد لوحظ تأثيرها بالمقارنة مع صخور كلسية معراة، حيث كان التطور الكارستي فيها أبطأ. ويضاف إلى ذلك بنية الصخور الكلسية، التي تتحكم في شدة التعرية والأشكال التضاريسية الناتجة.

أما ملاحظة التطور الكارستي وتحديد معدلات حدوثه، فهما من الأمور التي يصعب إجراؤها على المدى الطويل، وبخاصة في المناطق التي تأثرت عدة مرات بنشاط الجليديات، ولم تكن فيها الشروط البيئية ثابتة لفترات طويلة، وكذلك في المناطق المدارية التي تحوي أراضيها الكلسية أفضل الأمثلة النموذجية عن الطبوغرافيا الكارستية، يصعب أيضاً تقويم معدلات التطور الكارستي الذي شهد تغيرات كثيرة. وفي جميع الدراسات التي تهدف إلى تحديد معدلات الانحلال أو تشكل الطبوغرافيا الكارستية، يجب أن نأخذ جانب الحذر في اسقاط معدلات انحلال الكربونات في الوقت الحاضر على ما حصل في الماضي الجيولوجي.

## رسوبات كهوف الانحلال

تمتلئ بعض الكهوف جزئياً برسوبات سلتية وغضارية، وهي تمثل مواد كانت موجودة أصلاً في الصخور الكربوناتية المنحلة. وتحتوي كهوف أخرى رسوبات كلسية صلبة كيميائية المنشأ، تشكلت من قطرات الماء الراشحة من سقف الكهف وتدعى صخور القطرات dripstones، كما يقابلها في أرض الكهف رسوبات مماثلة، تشكلت من قطرات الماء المتساقط على أرض الكهف. وتأخذ هذه الرسوبات أشكالاً متنوعة، وتعد من أجمل مظاهر الكهوف والمغارات التي تجتذب الزوار. وأكثر أشكالها انتشاراً النوازل stalactites وتكون على شكل قناديل

تتدلى مـن السـقف. والصواعـد stalagmites وهـي بـروزات متطاولـة مـن أرض المغارة، وتتجه نحو النوازل، ويمكـن أن تتصـل الصواعـد بـالنوازل وتشـكل أعمـدة columns (شكل ٤ـ٢١).

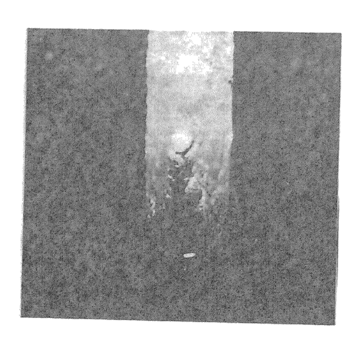


**شكل ٤ـ٢١: الصواعد والنوازل في الحجرة الكبيرة Big Chamber لمغارة كارلسباد.**

عندما تدخل المياه المشبعة بالمواد الكلسية إلى سقف المغارة، تبقى قطـرات المـاء معلقة، وتفقد جزءاً مما تحتويه من غاز ثنـائي أوكسيد الكربـون لنقصـان كميتـه في الجو المحيط، وترسب كل قطـرة حبيبـة بلوريـة دقيقـة مـن كربونـات الكلسـيوم في

سقف المغارة حول قناة مركزية، وباستمرار هذه العملية تتشكل النوازل (شكل٤-٢٢). وعندما تسقط القطرة على الأرض، وتستقر قليلاً تفقد جزءاً آخر من غاز ($CO_2$)، ويترسب منها حبيبة دقيقة من كربونات الكلسيوم، وبهذا تتراكم رسوبات الصواعد.

تختلف النوازل عن الصواعد في البنية، فالبلورات في النوازل تكون مرتبة بشكل شعاعي حول قناة مركزية، بينما تكون في الصواعد مرتبة في شكل طبقات فوق بعضها بعضاً.

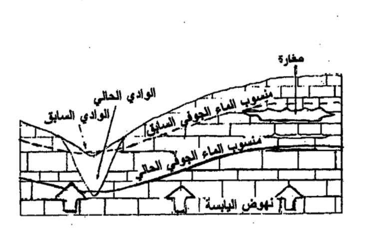


**شكل ٤-٢٢: قطرة من الماء في نهاية إحدى النوازل. ويظهر فيها تشكل بلورات الكالسيت.**

كذلك يمكن أن يؤدي ترسب كربونات الكلسيوم إلى تشكل عروق من الكالسيت، أو قشرة كلسية تغطي الجدر الصخرية. وتعد أيضاً المياه الجوفية من أهم

العوامل التي تحول الرسوبات المفككة إلى صخور صلبة متماسكة. إذ تتوضع المواد المنحلة منها كالكربونات والسيليكا وأكاسيد الحديد في الفراغات بين حبات الرمل أو السلت أو الغضار وتؤدي إلى تلاحمها.

إن هذا الترسيب الكيميائي لا يحدث في المغاور والكهوف، إلا إذا كانت مملوءة بالهواء، مع العلم أن معظم التجاويف الكهفية تتشكل تحت منسوب الماء الجوفي. إلا أن منسوب الماء الجوفي يمكن أن يهبط، ويفسح المجال لهذه التجاويف أن تتعرض للهواء وعندها يبدأ الترسيب الكيميائي. ويعود هبوط منسوب الماء الجوفي إلى نهوض اليابسة التي يرافقها تعميق الأنهار الجارية فيها لأوديتها (شكل ٤ـ٢٣). أو بسبب تغير الشروط المناخية من الرطوبة إلى الجفاف، مما يؤدي إلى انتقال الكهف أو المغارة تدريجياً من نطاق التشبع إلى نطاق التهوية، وبالتالي تغيّر الشروط من الانحلال إلى الترسيب.

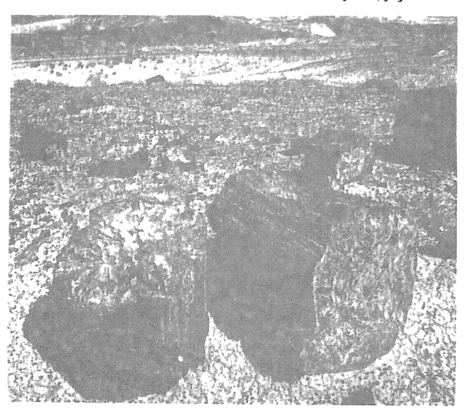



**شكل ٤ـ٢٣: أدى نهوض اليابسة إلى تعميق النهر لواديه وهبوط في منسوب الماء الجوفي، ووقوع المغاور في نطاق التهوية.**

ويمكن أن تُوضّع المياه الجوفية المتدفقة إلى سطح الأرض، رسوبات كلسية أو سيليسية على شكل صخور الطف والترافرتان travertine. وتُوضّع مياه الينابيع

الحارة. بالإضافة إلى ذلك مواد معدنية أخرى، كالكبريت والحديد وكبريت الزرنيخ وفلور الكلسيوم.

تقوم المياه الجوفية أحياناً بالابدال replacement، وهي عملية دياجينيزية تتضمن انحلال بعض الفلزات المكونة للصخور، وبالوقت نفسه ترسب مواد أخرى تأخذ شكلها وحجمها، مع حفظ الشكل النسيجي للمادة المزالة، وتعرف عملية الابدال هذه بالاستعاضة metasomatism، وإن أفضل الأمثلة النموذجية للاستعاضة هو الخشب المتحجر، حيث تحل السيليكا محل المادة النباتية في جذوع الأشجار وجذورها (شكل ٤ـ٢٤). ولا بد من القول أن عملية الاستعاضة لا تقتصر على إبدال بمادة عضوية مادة فلزية، إنما تشمل أيضاً إبدال بمواد فلزية جديدة مواد فلزية أخرى، مثل إحلال فلز البيريت محل فلز الكالسيت المؤلف للمستحاثات، وهي ظاهرة المستحاثات البيريتية.



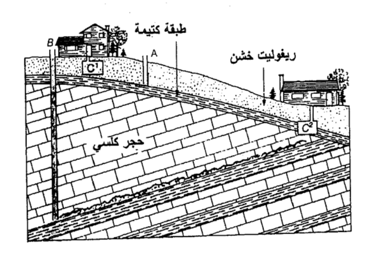
**شكل ٤ـ٢٤: جذوع أشجار متحجرة تحررت بالتجوية من طبقات غضارية. وقد استبدلت بموادها العضوية السيليكا.**

## بعض مشكلات المياه الجوفية التي يسببها الاستعمال البشري

يعد الماء من أهم الموارد الطبيعية التي يمتلكها الإنسان. فبالرغم من سهولة الحصول عليه، إلا أن التزايد السكاني المستمر يواجه نقصاً متزايداً في المخزون المائي في كثير من بقاع العالم، لذلك فإن الحصول على الماء الجوفي من الأمور التي تتطلب دراسة دقيقة جداً في تحديد مواقع جديدة لاستثمار المياه، وتأمين التوازن ما بين الاستهلاك والامداد المائي. وإن الحفاظ على نوعية الماء ذو أهمية كبيرة في المناطق التي تعاني من مشكلة النمو السكاني.

**١- نوعية الماء water quality**: يقصد بنوعية الماء الجوفي درجة حرارته وكمية المواد المعلقة والمواد المنحلة فيه ونوعيتها، والمادة العضوية الموجودة فيه (بصورة رئيسة الباكتريات) وعلاقتها بالاستعمال المطلوب.

إن المصدر الشائع لتلوث الماء الجوفي في الآبار والينابيع هو الصرف الصحي. فالتسرب من مجمعات المياه المستعملة في النظافة، ومن المجارير وغيرها من المياه القذرة، يؤدي إلى تلوث المياه الجوفية. وحين يحصل التلوث في مياه جوفية موجودة في صخور ذات فراغات مسامية كبيرة أو فتحات واسعة، مثل الرسوبات الحصوية الخشنة أو الحجر الكلسي الكارستي، فإن التلوث يحدث بسرعة ويمكن أن يمتد لمسافات بعيدة (شكل ٤-٢٥).



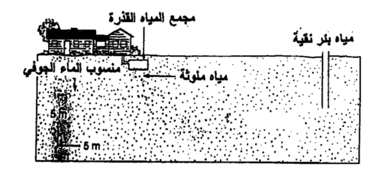

شكل ٤-٢٥: سرعة حركة المياه الجوفية خلال جيوب الصخور الكلسية لا يسمح بتنقيتها.

إلا انه حين يحدث التلوث في مياه جوفية محمولة في صخور دقيقة المسام ونفوذة مثل الحجر الرملي، فإن التلوث يزول بعد مسافة قصيرة لا تتجاوز (٣٠) متراً (شكل ٤ـ ٢٦). ويعود هذا الاختلاف إلى المساحة السطحية الداخلية لمسام الصخور التي تتحرك فيها المياه الملوثة. فقوة الجذب الجزيئي تمسك الماء وتزيد من نقاوته بالأسباب التالية:

١ـ تدمير الباكتريات بالأكسدة.

٢ـ ترشيح الباكتريا خارج الماء المتسرب.

٣ـ تدمير الباكتريات بعضويات أخرى تعمل على استهلاكها.




**شكل ٤ـ٢٦: تنقية المياه الجوفية الملوثة في الصخور الرملية.**

تحدث تنقية الماء المتغلغل في الأرض داخل نطاق التهوية وأيضاً في نطاق التشبع، وبما أن حبيبات الغضار أصغر بكثير من حبيبات الرمل، فيجب التوقع أن الغضار ذا المساحة السطحية الداخلية الكبيرة جداً، هو أفضل الأوساط التي تعمل على تنقية الماء الجوفي. إلا أن الرسوبات الغضارية ليست نموذجية لحركة الماء الجوفي لأنها كتيمة.

وفي كثير من المناطق تُحوّل مياه المصانع والمجاري إلى الأنهار، ومع أن بعض التنقية يمكن أن تجري خلال انتقالها بالنهر. إلا أن المسافة التي تنقل إليها لا تكون كافية لحصول التنقية، وغالباً ترتفع نسبة التلوث فيها لدرجة تصبح فيها العوامل الطبيعية غير فعالة.

**٢- تخزين النفايات الخطرة تحت الأرض:** إن احد الاهتمامات البيئية الرئيسة في البلدان الصناعية، هو احتياجات الصناعة فيها للتخلص من نفايات خطرة، وبخاصة المواد العالية السمّية أو المواد المشعة. وقد أثبتت الأيام أن إلقاء هذه النفايات على السطح يؤدي بسرعة إلى تلوث المياه السطحية والجوفية، وخلق مشكلات صحية خطيرة جداً، قد تؤدي إلى الوفاة.

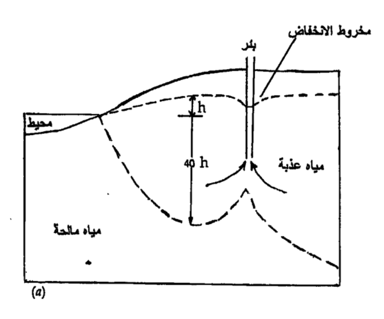
ففي البلدان التي تمتلك الأسلحة أو المفاعلات النووية لديها مشكلة التخلص من النفايات المشعة. وقد انتهت الدراسات التي أجريت حول هذا الموضوع، إلى أن دفن النفايات تحت سطح الأرض في أماكن مناسبة هو أسلم طريقة، شريطة أن توضع ضمن حاويات لا تتأثر كيميائياً بالمياه الجوفية، ولا فيزيائياً بالتشوهات الصخرية الطبيعية أو بعمليات الحفر تحت الأرض من قبل الإنسان.

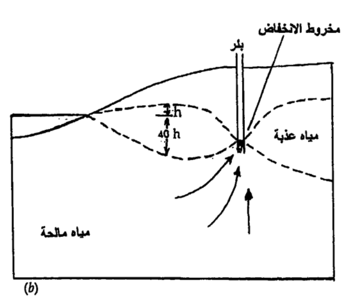
وإن وضع النفايات السامة تحت سطح الأرض، أو في أماكن عميقة جداً، يواجه الخوف من فعل المياه الجوفية. فالمياه الجوفية عامل حال بسبب طبيعتها الحمضية، وإن تماسها لأي مادة سامة بما فيها الحاويات التي تُعلب فيها النفايات، يجعلها تتآكل وتنحل وتنتشر بعيداً عنها بسرعة تعادل حركة المياه الجوفية البطيئة، وهذا يعني أنه على عشرات أو مئات أو ألوف السنين، يُمكن للمياه الجوفية أن تُحرك المواد الضارة المنحلة إلى مسافات كبيرة، وتدخلها في أنظمة هيدروجيولوجية سريعة الحركة.

إن التخزين الآمن للنفايات السامة أو المشعة تحت سطح الأرض على مدى زمني طويل، يتطلب معرفة واسعة حول أنظمة المياه الجوفية المحلية والإقليمية. ويقتضي ذلك أيضاً التوصل إلى فهم احتمال تغيّر هذه الأنظمة في المستقبل، بنتيجة تحركات القشرة الأرضية، وتغيرات المناخ محلياً واقليمياً، وغيرها من العوامل

الطبيعية، التي يمكن أن تؤثر في مواقع تخزين النفايات.

**٣- اجتياح المياه المالحة Saltwater invasion**: يوجد نوع خاص من تلوث الماء الجوفي هو اجتياح الماء المالح. ويحدث هذا في المناطق الشاطئية، وفي الجزر التي يوجد فيها مياه جوفية عذبة. ولابد لنا لفهم هذه المشكلة من أن نعرف العلاقة بين المياه الجوفية العذبة والمالحة. إن الوزن النوعي للماء الجوفي العذب أقل من الوزن النوعي للماء المالح الطبيعي، ولهذا فإن الماء العذب يطفو فوق الماء المالح مكوناً ما يشبه شكل العدسة، وممتداً في بعض الأحيان إلى أعماق كبيرة. فإذا لم يكن هناك جريان سطحي فإن هذا سيؤدي إلى توازن، تطفو فيه كتلة الماء العذب فوق الماء المالح. وحتى يتحقق هذا التوازن، يجب أن يعلو منسوب الماء الجوفي العذب فوق مستوى سطح البحر، بمقدار $(\frac{1}{40})$ من عمقه تحت هذا المستوى، وهذا يعنى أنه إذا انخفض منسوب الماء الجوفي العذب، بمقدار مترٍ واحدٍ، فإن قاعدة الماء العذب سترتفع بمقدار أربعين متراً. ولهذا فإن الضخ الجائر للمياه الجوفية من الآبار القريبة من المناطق الشاطئية، يؤدي إلى تشكل مخروط انخفاض في أعلى عدسة المياه الجوفية وقاعدتها، وهذا سيرفع مستوى الماء المالح في البئر ملوثاً محتواها (شكل٤-٢٧).






شكل ٤ـ٢٧: تلوث مياه البئر بالمياه المالحة.

a ـ قبل ضخ المياه.

b ـ بعد ضخ المياه.

**٤ـ خُسفُ الأراضي Land subsidence:** لقد أدى استنزاف المياه الجوفية في بعض الأماكن إلى هبوط الأراضي على مساحات واسعة. إن مثل هذه التأثيرات واضحة في الجنوب الغربي من الولايات المتحدة. حيث أدى ضخ المياه الجوفية للأغراض الزراعية إلى خُسف سطح الأرض، وحدوث أضرار فادحة في الأبنية والطرقات والجسور وتمديدات الأنابيب والمجارير تحت سطح الأرض، كما زاد في مساحة الأراضي المعرضة للفيضان.

ومما ينذر بالأخطار المخيفة هو الهبوط الذي يحدث في عدد من المدن الكبرى بنتيجة استنزاف المياه الجوفية، وبخاصة تلك المدن التي تم إنشاؤها على أراض مؤلفة من رسوبات سميكة وغير متماسكة تحوي كميات كبيرة من الماء، مثل سهول الفيضان والدلتات والسهول الشاطئية، أو أماكن بحيرات أو مستنقعات جافة.

إن ضخ المياه الجوفية من الآبار القريبة بعضها من بعض في هذه المناطق، أدى إلى انخفاض منسوب الماء الجوفي على نطاق واسع، وإزالة الماء من الرسوبات غير

المتماسكة، وبالتالي زوال الضغط الهيدروليكي، الذي كان يدعم تحمل هذه الأراضي للمنشآت التي تستند إليها. وبذلك تحول التحمل من مواد رسوبية مساماتها مملوءة بالماء إلى مواد حبيبية مساماتها فارغة، مما أدى إلى إعادة ارتصافها وتراصها ونقصان حجمها، وهبوط الأراضي الواقعة فوقها.

# الفصل الخامس

## الجليديات والنشاط الجليدي

الجليدية glacier جسم طبيعي صلب، ذو أبعاد كبيرة جداً، مؤلفة من بلورات من الجليد، تشكلت على سطح الأرض نتيجة التراكم المستمر للثلوج واعادة تبلورها، وتظهر عليها دلائل تشير إلى تحركها نحو الأسفل، فوق سطوح منحدرة بتأثير الثقالة الأرضية. وللجليديات علاقة وثيقة بدورة المياه في الطبيعة، إذ إن تشكلها يؤدي إلى انخفاض منسوب الماء في البحيرات والبحار والمحيطات، وتقهقرها يؤدي إلى ارتفاع منسوب الماء فيها. تغطي الجليديات مساحات تقرب من ١١٪ من السطح القاري، و٢,٧٪ من سطح الكرة الأرضية، وقد كانت خلال العمر الجليدي الرابعي Quaternary Ice Age تغطي ٣٥٪ من سطح القارات.

وللجليديات فعل بناء وتخريب، وهذا يؤدي إلى نحت وتغيير طبوغرافية سطح الأرض، ونقل كميات كبيرة من المواد المفتتة، وتوضع رسوبات متنوعة.

### خط الثلج

يتساقط الثلج على سطح الأرض في نطاقات مناخية مختلفة، إذ يتشكل من تكاثف بخار الماء الموجود في الهواء عندما تنخفض درجة الحرارة إلى ما دون درجة التجمد،

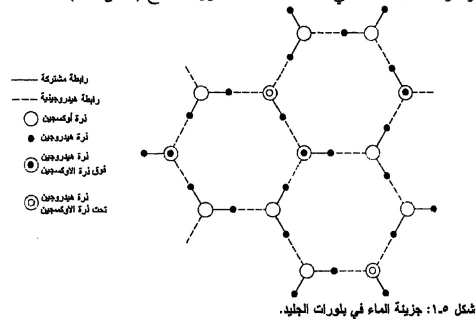
ويسقط على شكل ندف مؤلفة من معقدات بلورية جميلة ذات بلورات سداسية.

ففي المناطق التي يفوق فيها تساقط الثلوج ذوبانها، وحيث تكون الشروط المناخية ملائمة، فإن جزءاً من هذا الثلج يمكن يبقى خلال الصيف، ويتراكم تدريجياً على مر السنين، ويصبح ذا سماكات كبيرة مشكلاً حقول الثلج snow fields.

يعرف الخط الذي يمثل الحد الأسفل لغطاء ثلجي دائم بخط الثلج snow line. ويختلف ارتفاع هذا الخط عن سطح البحر باختلاف المناطق ومواقعها بالنسبة إلى خطوط العرض، إذ يصل إلى مستوى سطح البحر في المناطق القطبية، بينما تبقى الجليديات في المناطق الاستوائية محصورة في ذرى الجبال العالية، إذ يتراوح ارتفاع هذا الخط في الجبال العالية لشرق أفريقيا من (٥-٦) كيلو مترات عن مستوى سطح البحر.

## تشكل الجليديات

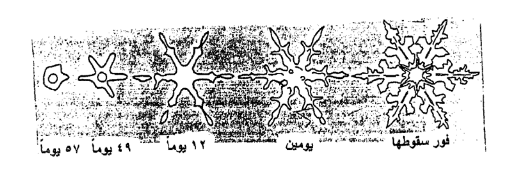
تتشكل الجليديات في المناطق الباردة التي تكون فيها درجة الحرارة منخفضة، وتتساقط فيها كميات كبيرة من الثلوج. وعندها تتكون الجليديات من التراكم المستمر لبلورات الثلج وإعادة تبلورها. فمن المعلوم أن وريقات الثلج snowflakes ذات تفرعات سداسية الجوانب، تنجم من ترابط الهيدروجين والأوكسجين، مما يعطي الأشكال المعقدة لبلورات الثلج (شكل ٥-١).




شكل ٥-١: جزيئة الماء في بلورات الجليد.

تكون جزيئات الماء في الحالة السائلة قادرة على التحرك متقاربة من بعضها بعضاً بفعل التجاذب القوي بين الأطراف المتعاكسة الشحنة لجزيئات الماء. أما في الحالة الصلبة فإن روابط الهيدروجين تبعد الجزيئات عن بعضها، وتكون البنية البلورية أكثر مسامية، مما يؤدي إلى أن تكون كثافة الثلج أقل من كثافة الماء.

عندما تصل بلورات الثلج إلى سطح الأرض، وتبدأ بالتراكم فوق بعضها بعضاً، تكون ذات مسامية عالية جداً تصل إلى نحو ٩٠٪. وبما أن الهواء يتخلخل في فراغاتها البلورية، فإن الأجزاء الدقيقة منها تزول بتحولها إلى بخار، لا يلبث أن يتكاثف في اتجاه مراكزها، فتصبح بلورات الثلج تدريجياً أصغر حجماً وذات سماكة اكبر، وتتحول إلى حبيبات مدورة، وهي حالة الثلج في نهاية الشتاء (شكل ٥-٢).

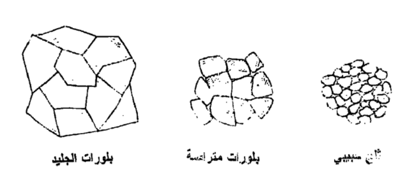



**شكل ٥-٢: تحول بلورات الثلج إلى حبيبات مدورة بعد مضي (٥٧) يوماً على سقوطها.**

عندما يغطي الثلج الجديد الثلج القديم ترتص الحبيبات بنتيجة الضغط المطبق عليها، وتتحول البلورات إلى مرحلة أكثر كثافة تعرف بمرحلة الثلج الحبيبي névé. وتشير هذه المرحلة إلى الحد الأعلى من زيادة الكثافة بالرص الميكانيكي. وبعد هذه المرحلة تصبح التغيرات الفيزيائية ناجمة من عمليات إعادة التبلور recrystallization processes.

وهنا تجدر الاشارة إلى أن القسم السطحي من حقول الثلج يتأثر بالحرارة الشمسية فيذوب جزء بسيط منه ويتسرب إلى الأعماق. ثم لا تلبث المياه على السطح أن تتجمد ثانية لتشكل صفيحة رقيقة من الصقيع، وتعاد العملية نفسها في المواسم الدافئة، وقد يترسب فوق هذه الصفائح بعض الرواسب الريحية، مما يعطي الثلوج المتراكمة نوعاً من التطبق، نستطيع بوساطته أن نعرف سماكة طبقة الثلج التي أضيفت كل عام، ونحسب عمر الجليد.

أما المياه المتسربة إلى الأعماق فتتبلور مولدة ضغطاً كبيراً على جميع أشكال وحجوم البلورات، مما يؤدي إلى ذوبان البلورات الصغيرة، ونمو البلورات الكبيرة على حسابها. وباستمرار عملية التبلور هذه من سنة لأخرى يتحول الثلج الحبيبي إلى بلورات جليد حبيبية الشكل وجيدة التراص (شكل ٥-٣). وبالرغم من إعادة التبلور والتحول إلى جليد، يبقى بين الحبيبات البلورية، غشاوة مائية رقيقة تحوي ايونات لبعض الكلوريدات وبخاصة كلور الصوديوم، وإن وجود مثل هذه الأيونات يخفض درجة التجمد ويُبقي الغشاوة في الحالة السائلة. وتلعب هذه الغشاوة دوراً كبيراً في حركة الجليديات. يكون الجليد في البدء مسامياً أبيض اللون، ثم يصبح متراصاً أزرق اللون وعديم المسامية.




شكل ٥-٣: عمليات إعادة التبلور التي تؤدي إلى تشكل بلورات الجليد. يمكن أن يصل قطر البلورة إلى بضعة سنتمترات. وفي كل مرحلة تزداد الكثافة.

يتصف الجليد ببعض الصفات المميزة للأنماط الصخرية الثلاثة. فهو يبدأ بالتبلور عند انخفاض درجة حرارة السائل ليشكل جسماً صلباً، وهي صفة مميزة للصخور النارية. كما أنه يتساقط على شكل حبيبات مفردة تتراكم على السطح مثل تراكم الرسوبات، ثم ترتص وتتطبق كالصخور الرسوبية. وتشير دلائل التدفق الداخلي وإعادة التبلور التي تلاحظ في الجليد إلى تأثير الضغط، وهما صفتان تميز الصخور الاستحالية. إلا أن الجليد يتميز عن أنواع الصخور بنقطة انصهاره المنخفضة، ووزنه النوعي المنخفض الذي يبلغ (٠,٩).

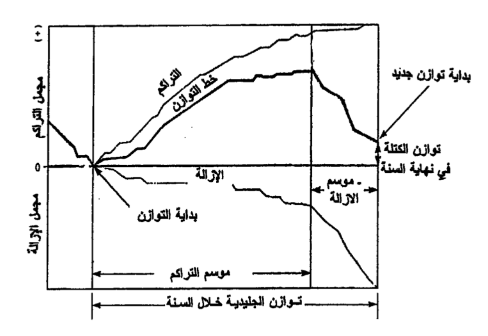
## توازن الكتل الجليدية

تتغير كتل الجليديات باستمرار من فصل لآخر حسب تغيرات الطقس، كما تتغير بمرور الزمن مع تغيّر الشروط المناخية المحلية، أو العالمية على سطح الأرض. فالتغيرات البيئية المستمرة تؤدي إلى تغيرات في معدل كمية الثلوج المتساقطة التي تضاف إلى الجليديات، وأيضاً في معدل الكمية التي تزول منها بالانصهار، وهذا ما يحدد حالة توازن الكتل الجليدية. وعلى هذا يمكن أن يعرف توازن الكتل الجليدية: بأنه مقدار التغيّر الذي يحدث في الكتلة الإجمالية للجليدية خلال سنة واحدة. ويُستخدم في قياس هذا التغير مصطلحان هما التراكم accumulation، أو كمية الثلج المتساقطة، والإزالة ablation أو كمية الجليد المنصهر.

تشمل الإزالة في الجليديات القطبية وتحت القطبية، تبخر جزء من ماء انصهار الجليد السطحي، والتبخر المباشر من الثلج بالتصعد، إضافة إلى ما ينصهر من الجليد في الأجزاء القاعدية، وانفصال كتل الجبال الطافية من الرفوف الجليدية.

تنمو الجليديات عندما يتساقط على سطحها كميات من الثلوج تفوق الكميات التي تزول منها، فهي بتعبير آخر بحالة توازن إيجابي (شكل٥ـ٤). وبالمقابل حين تزيد الكميات التي تزول منها على ما يضاف إليها من ثلوج، تكون في حالة توازن سلبي، وهذا ما يؤدي إلى تقدم الجليديات أو تراجعها. ويفصل خط

التوازن ما بين منطقة التراكم ومنطقة الإزالة، وهو يحدد السوية التي يتعادل فيها التراكم مع الازالة، وهو يتطابق مع الحد السفلي للثلج الجديد في نهاية الصيف في جليديات المناطق المعتدلة (خط الثلج). وعادة يتغير ارتفاع خط التوازن من سنة إلى أخرى، حيث يرتفع في السنوات الجافة، ويهبط في السنوات الرطبة. وقد كان خلال العصر الجليدي أخفض بمئات الأمتار مما هو عليه الآن.




شكل ٥-٤: رسم بياني يبين كيف يتحدد توازن الجليدية بالازالة والتراكم خلال دورة سنوية كاملة.

## أشكال الجليديات

يمكن تصنيف الجليديات اعتماداً على أشكالها وامتدادها واتجاه تحركها إلى:

١- جليديات الحلبات

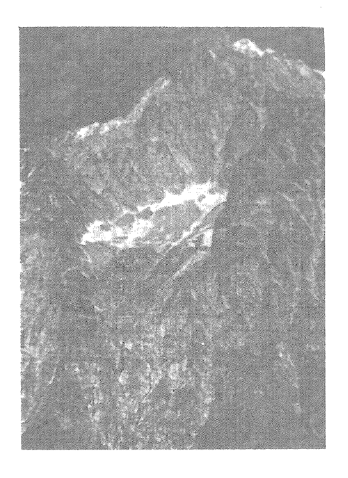
٢- جليديات الوادي

٣- جليديات السفوح

٤- القبعات الجليدية

د- الغطاءات الجليدية.

١- جليديات الحلبات Cirques glaciers: وهي جليديات صغيرة، تتخذ أشكالها واتجاه حركتها بالتضاريس المحيطة بها، فهي تشغل في معظم الأحوال منخفضاً محمياً من الرياح وأشعة الشمس، وتكون جدرانه شديدة الانحدار، ويأخذ قاعه شكلاً مقعراً (شكل ٥-٥).



شكل ٥-٥: جليدية الحلبات.

٢- جليديات الوادي Valley glaciers: وهي ألسنة جليدية تنتشر على جوانب ومنحدرات المرتفعات الجبلية، من أحواض تجمع الجليد التي تعلو خط الثلج. وهي تتقدم ببطء وبحركة خطية على طول أودية نهرية قديمة، ويتحدد

شكلها بالبنية الصخرية والشكل الحتي لهذه الوديان (شكل ٥-٦).

وهنا نلاحظ وجود علاقة وثيقة بين أحواض تجمع الجليد وتغذيتها من جهة، ومساحة اللسان الجليدي من جهة ثانية. فإذا كانت نسبة الثلج المتساقط كبيرة، تقدم اللسان الجليدي بنسبة كبيرة باتجاه أسفل المنحدرات الجبلية. وإذا ما ارتفعت درجة الحرارة أو قلت كمية الثلج المتساقط، تقهقر اللسان الجليدي. وتعرف هذه الألسنة الجليدية بالأنهار الجليدية لأنها تشق طريقها في وديان واضحة الجوانب، ويملؤها الجليد بدلاً من الماء.

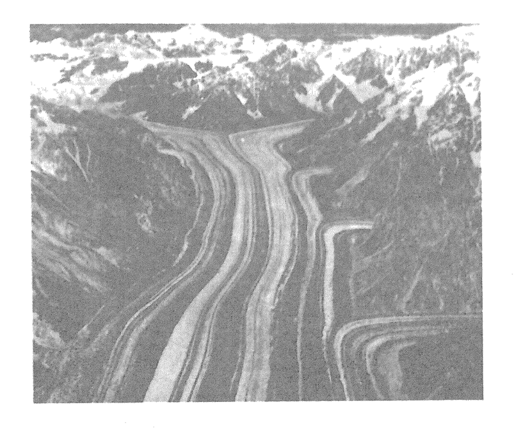


**شكل ٥-٦: جليديات الوادي**

يمكن تقسيم جليديات الوادي اعتماداً على مظاهرها البنيوية إلى جليديات بسيطة، وجليديات مركبة، فالأولى جليديات منفصلة دون روافد مغذية. بينما تكون الثانية مؤلفة من عدة جليديات مندمجة، يمكن تمثيلها بنهر ذي عدة روافد، مثل جليدية بارنارد في الآسكا (شكل ٥-٧).

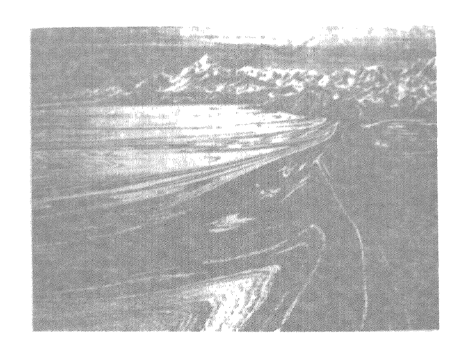
وتتميز الجليديات الرافدة بأنها تحتفظ بهويتها داخل التدفق الجليدي الرئيس،

بعكس مياه روافد الأنهار، التي تختلط مياهها مباشرة مع مياه النهر الرئيس.



**شكل ٥-٧: جليدية بارنارد Barnard وروافدها تشكل نهر الماموت الجليدي في الأسكا.**

**٣- جليديات السفوح Piedmont glaciers**: تتشكل عندما تنتهي جليدية الوادي البسيطة أو المركبة إلى السفوح الجبلية (شكل ٥-٨).



شكل ٥ـ٨: جليديات السفوح وموريناتها.

**٤ـ القبعات الجليدية Ice caps**: فهي تغطي الأراضي المرتفعة من السلاسل الجبلية في المناطق المعتدلة والمدارية، كما تغطي جزءاً كبيراً من مختلف الأراضي الجبلية في المناطق الباردة. وجميعها تظهر عليها آثار التدفق باتجاه الأسفل وباتجاه شعاعي. وأفضل الأمثلة عنها القبعة الجليدية في جبال الأنديز في البيرو. وهي قبعة جليدية مدارية تغطي مساحة تقرب من (٧٠) كيلو متراً مربعاً، وتقع حدودها السفلية على ارتفاعات تقرب من (٤٩٥٠) متراً. وإن أضخم قبعة جليدية في العالم، تقع في أيسلندا حيث تبلغ أبعادها (١٠٠×١٤٠)كم، وتصل امتداداتها إلى محاذاة الشواطيء الجنوبية الشرقية (شكل ٥ـ٩).



شكل ٥ــ٩: القبعة الجليدية.

**٥ــ الغطاءات الجليدية Ice sheets**: وتعرف أيضـا بالجليديـات القاريـة continental glaciers وهي أضخم ما عرف من جليديات العالم، وتغطي معظم سطح اليابسة التي تقع تحتها. ويقتصر وجود الغطاءات الجليدية في وقتنا الحالي على جزيرة غرينلاند Greenland وقارة القطب الجنوبي Antarctica، حيث يتجمـع فيها ما يقرب من ٩٥% من جليد العالم، وتبلغ مساحتها حوالي ١٠% من سطح اليابسة. وتتميز هذه الجليديات بسماكتها الكبـيرة وبحركتـها الواسـعة باتجـاه الأطراف. ويعتقد أنها تمثل البقية الباقية من الغطاءات الجليدية والجليديات الضخمة التي غطت مساحات واسعة خلال العصر الجليدي البليستوسيني من أمريكا الشمالية وأوربا وأسيا وقارة القطب الجنوبي.

**أ ــ الغطاء الجليدي في جزيرة غرينلاند**: يغطي هذا الغطاء ثلاثة أرباع مسـاحة الجزيرة، وتبلغ السماكة القصوى في الأجزاء المركزية لهذا الغطـاء نحـو (٣٤٠٨) أمتار. وتقل باتجاه الأطراف (شكل ٥ــ١٠). وقد أدى وزنها الهـائل إلى هبـوط أجزاء من القشرة الأرضية الواقعة تحتها إلى ما دون مستوى سطح البحر. يعد هذا

[illegible] من الغرب حاجز جبلي، حيث يتميز الساحل الغربي بكثرة [illegible] على طول الساحل الشرقي، فكثيراً ما يمتد الغطاء الجليدي على شكل [illegible] على سطح اليابسة، وتصل إلى البحر، حيث تشكل جبالاً جليدية ضخمة، قد يصل طول بعضها إلى نحو (٤٠) كيلو متراً وترتفع إلى نحو ٨٠٠ ـ ٩٠٠ متراً فوق سطح الماء. ويبرز فوق الغطاء الجليدي قمم جبلية ناتئة [illegible] بالنوناتاك nunataks (شكل ٥ـ١١).



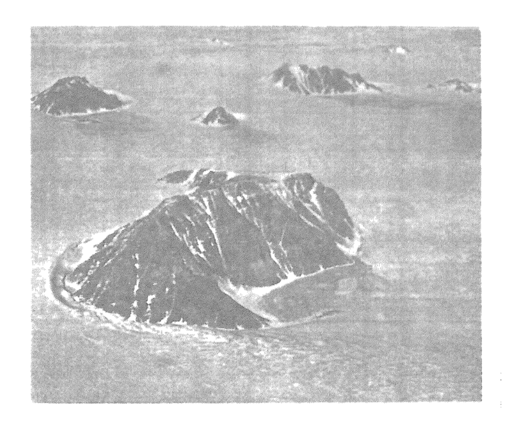

**شكل ٥ـ١٠: بروفيل عبر وسط جزيرة غرينلاند من خليج ديسكو Disco في الغرب إلى فرانز جوزيف Franz Josef Land في الشرق.**

وقد أجريت في السنوات الأخيرة حسابات تقريبية على معدل الضياع السنوي لهذا الغطاء الجليدي فكانت كالتالي:

| | |
|---|---|
| معدل الازالة السنوي بالذوبان والتصعد نحو | ٣١٥كم³ من الماء |
| معدل الازالة السنوي بانفصال الجبال الطافية نحو | ٢١٥كم³ |
| إذن معدل الازالة الاجمالي يكون | ٥٣٠كم³ |
| أما التراكم السنوي من الثلوج | ٤٤٦كم³ |

وهكذا فإن كمية الازالة تفوق كمية التراكم السنوي، وهذا يعني أن الغطاء

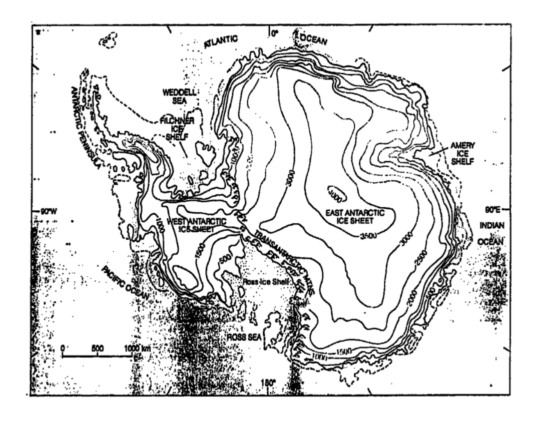
الجليدي يفقد من كتلته ما يعادل (٨٤) كم$^{٣}$ من الماء سنوياً. فإذا عرفنا أن الحجم الكلي للجليدية هو (٣,٧×١٠$^{٦}$) كم$^{٣}$ أي ما يعادل (٣,٤×١٠$^{٦}$)كم$^{٣}$ من الماء، فإنها ستحتاج إلى مدة تقرب من (٤٠,٠٠٠) سنة حتى تزول الجليدية نهائياً، إذا استمرت الشروط المناخية كما هي عليه الآن.



**شكل ٥-١١: النواتئ في شرقي جزيرة غرينلاند، تصل إلى ارتفاع حوالي ٣٠٠متراً فوق سطح الغطاء الجليدي.**

**ب ـ الغطاء الجليدي في قارة القطب الجنوبي:** تمثل عادة قارة القطب الجنوبي على الخرائط بأنها تقع بكاملها تحت غطاء جليدي واحد. وفي الواقع تقع هذه القارة

تحت غطائين جليديين يلتقيان على امتداد سلاسل جبلية، تتجه من الشمال إلى الجنوب، وتقع في النصف الغربي لهذه القارة (شكل ٥ـ١٢). والغطاء الجليدي الشرقي أكبر بكثير من الغطاء الجليدي الغربي، ويغطي قارة القطب الجنوبي وهو الغطاء القطبي الوحيد في العالم بالمقارنة مع القطب الشمالي الذي يقع في مركز المحيط المتجمد الشمالي وتغطيه طبقة رقيقة من الجليد.




**شكل ٥ـ١٢ يوضح الغطاء الجليدي الشرقي والغطاء الجليدي الغربي يفصلهما سلاسل جبلية تمتد من الشمال إلى الجنوب في قارة القطب الجنوبي.**

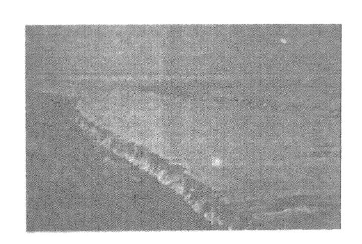
وتتميز قارة القطب الجنوبي بإحتوائها على أعلى معدل للمرتفعات الجبلية، وأدنى معدل لدرجات الحرارة بالنسبة لمختلف القارات. أما غطاؤها الجليدي الغربي فيغطي

مجموعة من جزر أرخبيل القطب الجنوبي Antarctica archipelago.

وقد دلت القياسات التي أجريت على سماكات جليد قارة القطب الجنوبي على أنها تصل إلى (٣٦٠٠) متر أو اكثر. ويقدر الحجم الكلي للغطائين الجليديين في هذه القارة بـ (٢٤×١٠$^{٦}$)كم$^{٣}$. وإذا ما ذابت هذه الكمية فإنها سترفع مستوى مياه البحار في العالم إلى ما يقرب من (٦٥) متراً على منسوبها الحالي.

أما القبعات الجليدية فلها هندسة بسيطة، إذا ما قورنت بالغطاءات الجليدية، فهي عادة قبة مفردة وعريضة، بينما يكون للغطاءات الجليدية تعقيد هندسي أكبر، بافتراض أنها مؤلفة من عدد كبير من القبعات، التي تشكل تراكمات سرجية يتحرك فيها الجليد باتجاه الأطراف، ليتلاقى بعضها مع بعض في المنخفضات، ويدل على ذلك آثار التحرك داخل الغطاء الجليدي. ولا تبقى هذه الهيئات ثابتة، فقد تُغيّر مواقعها مع مرور الزمن، ونمو الغطاء الجليدي أو تقلصه.

تتشكل في الهوامش البحرية للغطاءات الجليدية امتدادات بحرية تدعى رفوف الجليد Ice shelves، التي تتطور بشكل جيد في الخلجان الشاطئية الكبيرة (شكل٥-١٣). فهي متصلة بجليد اليابسة، وتمتد إلى داخل البحر لتنتهي بجروف جليدية شديدة الانحدار، يصل ارتفاعها عن سطح البحر إلى نحو (٥٠) متراً، كما يمكن أن يصل امتدادها داخل البحر إلى مئات الكيلومترات، وهي تتغذى باستمرار من تدفق الجليد من اليابسة ومن تساقط الثلوج على سطحها. وتنفصل عن أطراف هذه الرفوف الجليدية كتل جليدية هائلة الحجم تطفو في البحر، ويمكن أن تأخذ أشكال جبال أو جزر عائمة Ice bergs (شكل ٥-١٤). وقد استخدم بعض هذه الجزر العائمة لإقامة محطات علمية معزولة.



**شكل ٥-١٣: الرف الجليدي في قارة القطب الجنوبي.**



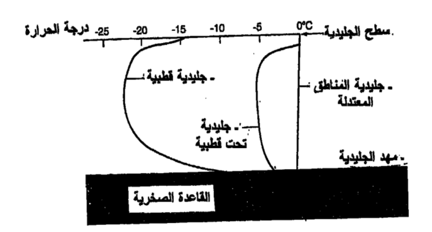
**شكل ٥-١٤: كتلة جليدية عائمة في بحر روس Ross، وقد انفصلت عن الرف الجليدي روس في قارة القطب الجنوبي.**

وقد أجريت مؤخراً دراسات حول الجدوى الاقتصادية، التي يمكن الحصول عليها إذا أمكن نقل بعض الجبال الجليدية العائمة، من قارة القطب الجنوبي، إلى بعض أقطار المناطق الجافة في الشرق الأوسط، حيث يمكن الحصول من انصهارها على كميات كبيرة من المياه العذبة لري الأراضي الزراعية، على الرغم من فقدان جزء كبير منها أثناء رحلتها الطويلة. وقد نجد في يوم ما من المستقبل حقولاً زراعية واسعة في مناطق صحراوية تسقى من مياه الجبال الجليدية، التي تشكلت من الثلوج التي تساقطت في أواسط قارة القطب الجنوبي منذ عشرات ألوف السنين.

## حرارة داخل الجليديات

باستثناء الطبقة السطحية من الجليديات التي تتجمد في الشتاء، فإن الجليد في داخل معظم الجليديات يكون عند نقطة الانصهار بالضغط pressure melting point، وهي درجة حرارة انصهار الجليد تحت ضغط معين (شكل ٥-١٥). وتحت مثل هذه الشروط يمكن أن يوجد الماء والجليد مع بعضهما بعضا بحالة توازن. فجليديات المناطق الدافئة يكون معظم جليدها عند نقطة الانصهار بالضغط. أما في جليديات المناطق الباردة حيث يكون معدل حرارة الجو السنوية دون درجة التجمد، وتكون حرارة جليدها أدنى من نقطة الانصهار بالضغط ولا يحصل فيها انصهار، أو قد يحصل ولكن على نطاق ضيق، ويسمى هذا النوع من الجليديات، الجليديات القطبية polar glaciers. أما الجليديات تحت القطبية subpolar glaciers فهي بمثابة نموذج وسطي يمكن أن يكون جليدها السطحي عند نقطة الانصهار بالضغط في فصل الصيف، أو أن جليدها تحت السطح بمتر أو مترين يكون بحرارة أدنى من درجة التجمد.

أما الجليديات الضخمة الواقعة في أعالي السلاسل الجبلية، فيمكن أن تحوي جليداً قطبياً أو تحت قطبي في أجزائها العلوية، وجليدياً معتدلاً في أجزائها السفلية. أما الجليد في الأجزاء القاعدية من الغطاءات الجليدية فيمكن أن يكون في نقطة الانصهار تحت الضغط، بسبب خضوعه إلى ضغوط عالية ناجمة عن السماكة الكبيرة لهذه الغطاءات.



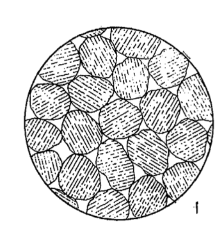

**شكل ٥ـ١٥: رسم بيـاني يوضح تبـاين درجـات الحـرارة مـا بين الجليديـات القطبيـة وتحـت القطبية وفـي المناطق المعتدلة.**

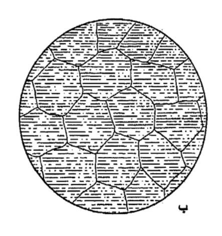
إن حـرارة الجليـد عـامل مهـم في تحركـه. ويلعـب مـاء الانصهـار في قـاعدة الجليديات دور الزيت المخفف للاحتكاك، ويسـهل تحـرك الجليديـة وانزلاقهـا. أمـا الجليديات القطبية فتكون باردة جداً لدرجة تجعلها متجمدة بكاملهـا فـوق القـاعدة الصخرية التي تستند إليها، ولا تشمل ظواهر الحركة فيها عمليات انزلاق قـاعدي، ويكون معدل تدفقها بطيئاً للغاية.

## حركة الجليديات

تدعى حركة الجليديات بالتدفق flow. وقد يبدو أن هذا التعبير غير متطابق مع طبيعة الجليد الصلب. إلا أن الجليد بطبيعته قـابل للتدفـق. أمـا طريقـة التدفـق فهـي مجموعة من عمليات معقدة يمكن أن نجملها في نمطين رئيسين: الأول التدفـق اللـدن plastic flow، ويشمل الحركة داخل الجليد. إذ إن الجليد يتصرف عـادة تصـرف الأجسام الصلبة الكسورة brittle solid، إلى أن يصل الضغط الواقـع فوقـه إلى مـا

يعادل وزن سماكة (٥٠) متراً من الجليد، وحينئذ يسلك سلوك المادة اللدنـة، ويبـدأ بالتدفق على سطح منحدر. وهذا يعـود إلى البنيـة الجزيئيـة للجليـد. إذ يتـألف مـن طبقات من الجزيئات المتراصة بعضها فوق بعض. وان الروابط bonds بين الطبقات المتتابعة أضعف من تلك الموجودة بين الجزيئات في الطبقة الواحدة. وحـين يتجـاوز الجهد قوة الروابط بين الطبقات فإنها تنزلق فوق بعضها بعضاً. وقد دلت دراسـات النسيج الجليدي بالمجهر الكترونـي: أن كل بلورة قد غـيرت مـن شـكلها ووضعيتهـا تحت تأثير اختلاف الجهد، وأصبحت البلورات جميعها موجهة حسب اتجاه الحركـة (شكل ٥-١٦). ويعتقد إن الغشاوة الكلوريدية الموجودة بين البلورات قد ساهمت في هذه العملية.



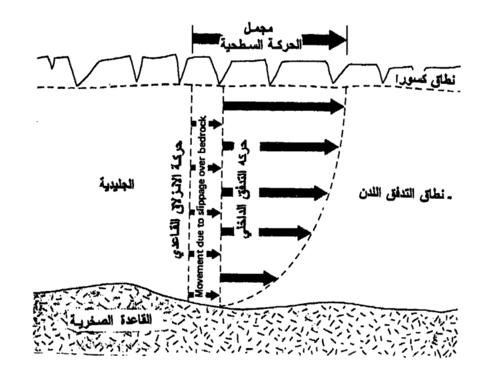




**شكل ٥- ١٦: يوضح البلورات في الثلج الحبيبي (أ)، والبلورات في الجليد (ب). تشير الخطوط في البلـورة إلى التوجيه.**

أما النمط الثاني فهو انـزلاق كتلـة كاملـة مـن الجليـد علـى القـاعدة الصخريـة ويعرف بالانزلاق القـاعدي basal slip، حيـث تقـوم المياه الموجـودة في أعمـاق الجليدية، بنتيجة الانصهار بالضغط، كرافعـه هيدروليكيـة أو كمزلـق يسـاعد علـى

حركة الجليد فوق الصخور، باستثناء الجليديات القطبية حيث لا يحصل فيها إنصهار بالضغط وتبقى الجليدية ملتصقة بالقاعدة الصخرية.

وهكذا فإن الحركة الإجمالية للجليد هي مجموع التدفق اللدن والانزلاق القاعدي كما هو واضح في الشكل (٥-١٧).



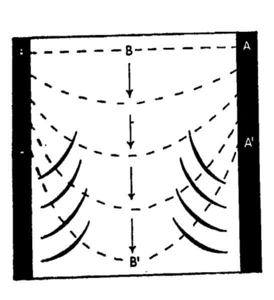

**شكل ٥-١٧: رسم يوضح نمطي الحركة للجليديات، وهما الانزلاق على الصخور القاعدية والتدفق الداخلي.**

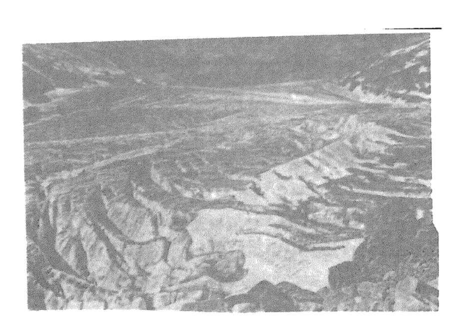
ينجم من تدفق الجليديات الشقوق crevasses والهوة الجليدية Bergschrund.

**الشقوق:** يكون للجليديات عادة قشرة خارجية تصل سماكتها أحياناً إلى نحو (٦٠) متراً، وغالباً تكون سماكتها أقل بكثير، وهي محمولة على القسم العميق من الجليدية

ذات التدفق اللدن.

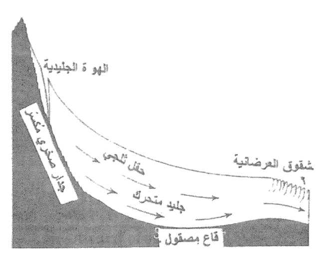
يتصف هذا القسم السطحي من الجليدية، بأنه يسلك سلوك الأجسام الصلبة الكسورة لعدم وجود ثقل عليه. ويظهر ذلك بشكل واضح عندما تتدفق الجليدية على سطح شديد الانحدار، مما يجعل الجليد السطحي خاضعاً لقوى شد فيتشقق عرضانياً نيتجة التمدد على شكل ثغرات عميقة تعرف بالشقوق العرضانية transverse crevasses، حيث تتميز بشكل قاعها المحدب. وتتشكل أيضاً شقوق هامشية، تتجه بصورة مائلة نحو حافة الجليدية وعاليتها (شكل ٥ـ١٨)، لإختلاف سرعة التدفق ما بين الوسط والجوانب. أما الشقوق الطولانية فتكون موازية لاتجاه تدفق الجليدية، وتتشكل في الأجزاء العريضة منها نتيجة التدفق المنفرج. وكثيراً ما تتقاطع هذه الشقوق في جميع الاتجاهات إذا ما اشتد انحدار الوادي الجليدي بصورة مفاجئة، ويتكون ما يسمى الشلال الجليدي Icefall، الذي تظهر عنده مجموعة من الشقوق الغائرة العميقة التي تؤدي إلى انفصال كتل ضخمة من الجليد، ويحدث التَّيْهُورْ avalanches الجليدي. وهي تلاحظ بشكل واضح في جليديات الوادي التي تنحدر من قمة مون بلان Mont Blane في سويسرا. وفي فصل الصيف تجري المياه الناجمة من ذوبان الجليد على شكل جداول قصيرة تنحدر مياهها نحو الشقوق مشكلة ما يشبه البحيرات.





**شكل ٥-١٨: يوضح الشقوق الجليدية.**
أ - رسم تخطيطي يبين تشكل الشقوق الهامشية نتيجة تفاوت السرعة.
ب - جليدية الرون في سويسرا تظهر فيها الشقوق العرضانية.

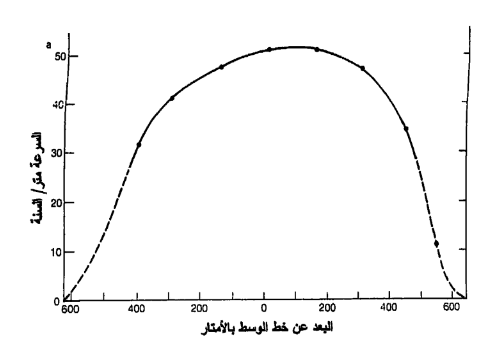
يوجد نمط خاص من الشقوق يعرف بـالهوة الجليدية، فهي هوة عميقة جداً وعريضة تكونت نتيجة انحدار اللسان الجليدي من جليدية الحلبات (شكل ٥-١٩).




**شكل ٥-١٩: رسم تخطيطي يوضح تشكل الهوة الجليدية.**

إن وجود الشقوق على سطح الجليدية هي ظاهرة أوجدتها حركة الجليديات، فهي صعبة العبور وخطرة جداً لعمقها، حتى إنها أحياناً تصل أعماقها إلى نحو (٥٠) متراً، وبخاصة بعد عاصفة ثلجية حيث تصبح الشقوق مخبأة بوساطة الجسور الثلجية.

**معدلات التدفق Rates of flow**: يمكن قياس سرعة تدفق جليدية ما في وادٍ جليدي بتثبيت أعمدة متراصفة عرضانياً على سطحها، وقياس مسافات تحركها خلال وحدة زمنية (شكل ٥ـ ٢٠). وقد أظهرت القياسات التي أجريت بهذه الطريقة أن الجزء المركزي من الجليدية يتدفق بسرعة أكبر منها في الجوانب، وأن توزع السرعة في المقطع العرضاني للجليدية يماثل توزع السرعة في التيار النهري. ويعود ذلك إلى تزايد الاحتكاك تدريجياً باتجاه الجوانب حيث يصبح أعظمياً.




**شكل ٥ـ ٢٠: توزع السرعة في المقطع العرضاني. تكون السرعة أكبر ما يمكن في وسط الجليد ثم تتناقص باتجاه هوامش الجليدية.**

وقد لوحظ أيضاً تغير في سرعة التدفق من السطح باتجاه القاعدة الصخرية، التي تتحرك فوقها الجليدية، بوساطة حفر آبار تخترق الجليدية باتجاه شاقولي، ثم قياس تزايد ميلها عن الوضع الشاقولي بمقياس الميل inclinometer. وبمتابعة تكرار القياسات في أعماق مختلفة من هذه الآبار، يمكن تقدير سرعة التدفق الجليدي في كل سوية من هذه الآبار خلال سنة كاملة. وقد أظهرت القياسات التي سجلت في هذه الطريقة أن سرعة التدفق تتناقص باتجاه القاعدة الصخرية وباتجاه هوامش الجليدية.

عندما تكون الجليدية في حالة توازن فإن كمية الجليد المتدفق عبر مقطع عرضاني شاقولي في منطقة التراكم، يجب أن تعادل كمية الثلوج المضافة إلى سطح الجليد. وبالوقت نفسه يجب أن تكون كمية الجليد المتدفقة عبر مقطع عرضاني شاقولي في منطقة الإزالة معادلة لكمية الجليد المزاح بالانصهار في نهاية الجليدية. لذلك يجب أيضاً أن يكون الجليد المتدفق في أي مقطع عرضاني متزايداً باتجاه الأسفل حتى خط التوازن، ثم يصبح متناقصاً بالابتعاد عنه نحو الأسفل. أي أن سرعة التدفق تكون أعظمية عند خط التوازن. وقد لوحظ وجود معدلات تدفق عالية في الأماكن التي تتحرك فيها الجليديات فوق جرف صخري حيث تشكل شلالات جليدية.

تتراوح سرعات التدفق في معظم الجليديات ما بين بضعة سنتمترات إلى بضعة أمتار في اليوم. وربما تمضي مئات السنين حتى يصل الثلج الذي تساقط في منطقة التراكم لجليدية طويلة جداً إلى التكشف في مقدمة الجليدية. وقد أظهرت القياسات التي أجريت في الأجزاء الهامشية لغطائي جليد القطب الجنوبي، أن معدلات سرعة التدفق تقرب من (٥٠) متراً في السنة أو (١٥) سنتمتراً باليوم.

## النشاط الجليدي Glaciation

تتميز أشكال الأراضي الواقعة في كندا وشمال الولايات المتحدة وشمال أوربا عن غيرها من الأراضي بمظاهر تشير إلى أنها كانت في الماضي مسرحاً لنشاط الجليديات. ويشمل النشاط الجليدي عمليات حت ونقل وترسيب تؤدي إلى

تعديلات في أشكال سطح الأرض. وقد بقيت هذه التعديلات واضحة في هذه الأراضي، حيث لم تتمكن عمليات التجوية وتبدد الكتل والحت المائي من إزالة معالمها، وبقيت مظاهر هذه الأراضي بدون تغيير يُذكر منذ نهاية العصر الجليدي.

## ١- النقل الجليدي Glacial transport

يختلف نقل المواد الرسوبية بالجليديات عن نقلها بالأنهار وذلك بطريقة حملها. فالجليديات تحمل جزءاً من حمولتها في داخلها وجزءاً آخر في مقدمتها وحواشيها الجانبية أو على سطحها، كما أنها قادرة على حمل ونقل قطع صخرية بحجوم وأوزان تفوق كثيراً ما يمكن أن تحمله التيارات النهرية. وتنقل الجليديات جميع المواد بمختلف حجومها جنباً إلى جنب دون أن تفرزها حسب حجومها وأوزانها. ومعظم حمولة الجليديات تتركز في قاعدتها، وهي نطاق التماس بين الجليد والقاعدة الصخرية، حيث يحصل البري والسحج والحفر والاقتلاع. وتأتي معظم المواد الموجودة على سطح الجليدية من تراكم ما يتساقط عليها من جوانب الأودية والجروف الواقعة على جانبيها.

تتألف كمية كبيرة من الحمولة في قاعدة الجليديات من الرمل والسلت، حيث تكون حبيباتها غير مجواة وذات أطراف حادة زاويّة، وهي تمثل نتاج تحطيم الصخور وسحقها بالجليديات وتسمى الطحين الصخري rock flour. وهي تختلف عن الحبات المدورة الموجودة في رسوبات غير جليدية.

## الحت الجليدي: Glacial erosion

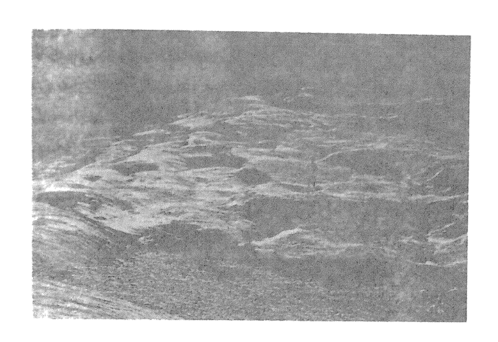
عندما تتحرك الجليديات فوق قواعدها الصخرية تقوم بدور المحراث والمبرد والمزلجة، بفعل قوة ضغطها وثقلها وما تحمله من القطع والمواد الصخرية مختلفة الحجوم، فهي تحتك بصخور القاعدة وتسحج سطوحها وتنحتها وتصقلها، وتشكل عليها تحززات موازية لمسار الجليدية تعرف التحززات الجليدية glacial strations. كما يمكن أن تحفر فيها أخاديد grooves طولانية موازية لهذه التحززات (شكل٥-٢١). كما يتطور على القطع الصخرية التي تكون بتماس مع القاع

سطوح مستوية تحوي تحززات مشابهة.



**شكل ٥ـ٢١: صورة تبين الأخاديد والتحززات على سطح القاعدة الصخرية التي تشكلت نتيجة الحت الجليدي.**

تلعب الحبيبات الرملية والسلتية الموجودة في قاعدة الجليدية دور ورق السمبادج sand paper بحيث تصقل السطوح الصخرية، وقد تجعلها ملساء ناعمة تعكس الضوء. وبالوقت نفسه فإن جر الجليدية فوق الصخور يؤدي إلى تحطيم كتل صخرية تكون عادة على طول الشقوق والفواصل وتقتلعها وتترك في مكانها حفراً شكل (٥ـ٢٢).

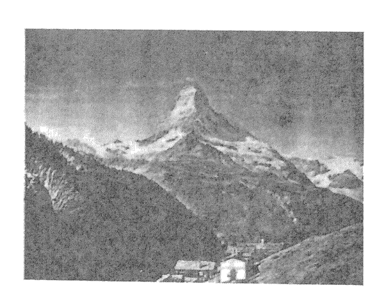


**شكل ٥-٢٢: تشكل الحفر على طول الشقوق والفواصل.**

## المظاهر الحتية في مناطق الجليديات الجبلية

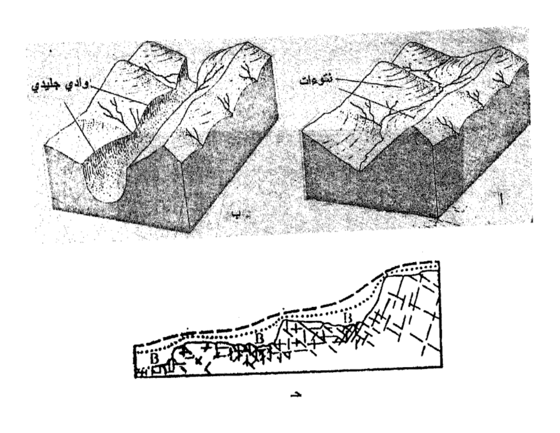
**أ ـ الحلبات الجليدية والأشكال القريبة منها:** تعود معظم الهيئات الحتية لأعالي السلاسل الجبلية في كثير من أنحاء العالم إلى نشاط الجليديات. ففي مثل هذه المناطق توجد جملة من أشكال اليابسة التي تحمل طابع الحت الجليدي، ومن بين هذه الأشكال نذكر الحلبات cirques وهي على شكل حفر حوضية، تقع على جانب من الجبل، محاطة بجروف صخرية شديدة الانحدار من ثلاثة جوانب، وتكون مفتوحة في جانبها السفلي.

تتكون الحلبات عند بداية الوديان الجليدية. ويعتقد أنها كانت جوانب جبلية وعرة تحتوي فجوات حفرتها المسيلات المائية، ونتيجة تعاقب التجمد والذوبان توسعت هذه الفجوات واتصل بعضها مع بعض. حيث تقوم الثلوج المتراكمة على توسيعها جانبياً نتيجة تفكك صخور هوامشها، ثم تعمل المياه الناجمة عن الذوبان على إزالة المواد التي تتساقط عند الهوامش، هذا بالاضافة على اشتداد تراكم الثلوج في وسط المنطقة الحوضية وحفرها باتجاه شاقولي. ويعتقد بعض الجيومورفولوجيين أن هذه الحلبات كانت أماكن لبحيرات جبلية صغيرة تعرف في اسكتلندا باسم تارن Tarn. وتتشكل مع تزايد وجود هذه الحلبات وتطورها في الجوانب المتقابلة من الجبال قمم حادة هرمية الشكل تعرف بالقرون horns (شكل٥-٢٤). وقد تستمر الحلبات المتجاورة في الاتساع، مما يؤدي إلى تشكل نتوءات جبلية حادة serrate ridges تفصل بينهما. وهذه المظاهر مميزة بشكل واضح في جبال الألب. وهكذا تتميز القمم الجبلية في المناطق التي تتأثر بعمليات الحت الجليدي، بأنها قمم حادة تختلف تمام الاختلاف عن القمم والتضاريس المستديرة التي توجد في الأقاليم الرطبة.



**شكل ٥-٢٣: قمة جبلية على شكل هرم في جبل الماترهورن Metterhorn في جبال الألب السويسرية.**

ب ـ **الوديان الجليدية Glacial valleys**: تعد الوديان الجليدية بصورة عامة من أهم الظاهرات الجيومورفولوجية التي تتميز بها السلاسل الجبلية شاهقة الارتفاع. ومن المعروف أن معظم الألسنة الجليدية تجري في أودية نهرية قديمة حفرتها المياه الجارية. ثم تبدأ بتعميق أوديتها بضغط جليدها على القاع وبما تحمله من مواد مفتتة، مما يؤدي إلى شدة عمق هذه الأودية، وذلك لأن مقدرة الجليديات على الحت الشاقولي تفوق كثيراً مقدرتها على الحت الجانبي، ولهذا تتميز الأودية الجليدية بعمقها الكبير وبقلة اتساعها، بحيث يبدو المقطع العرضي على شكل حرف (U) اللاتيني. أما المقطع الطولاني للوادي الجليدي، فهو مميز أيضاً بوجود تدرجات متتابعة غير نظامية تفصل بينهما أحواض قليلة العمق، يمكن أن تنسب إلى توسيع الشقوق والفواصل في الصخور القاعدية، أو اقتلاع كثير منها، وأحياناً ترجع إلى تغير النمط الصخري على امتداد الوادي الجليدي (شكل٥ـ٢٤).




شكل ٥ـ ٢٤: أ ـ مقطع عرضي لوادي نهري. ب ـ مقطع عرضي لوادي جليدي تشكل على حساب الوادي النهري. حـ مقطع طولاني لوادي جليدي. ويشير الخط المنقط إلى سطح الجليدية المتلاشية.

تتميز الوديان الجليدية بأنها أكثر استقامة من وديان الأنهار العادية، وذلـك لأن الجليد جسم صلب لا يتبع في حركته منعطفات الوادي القديم، فإذا صادفته صخور ناتئة في جوانب الوادي، فإنه يكسرها ويجرفها معه، وان قابل لسـاناً صخرياً ممتداً من أحد الجوانب فإن يدأب في حته حتى يقضي عليه. كما تتميز هـذه الوديـان بكون أراضيها أخفض بكثير من الوديان التي ترفدها، والتي يتدفـق منهـا الجليـد إلى الوادي الرئيس على شـكل شلال جليدي. ويصطلح على تسمية هـذه الوديـان الرافدة بالوديان المعلقة **hanging valleys**.

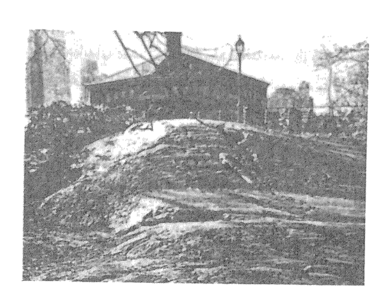
وقد تشـغل الجليديـات جميع أجزاء وديانهـا، بينمـا تشـغل جليديـات أخـرى الأجزاء العليا من وديانها، بحيث يتاح المجال في سافلة هذه الوديان لنشاط عمليـات تبدد الكتل وحت المجاري المائية، وغالباً تتوج عالية الوادي الجليدي حلبة جليدية أو مجموعة من الحلبات.

**حـ - الفيوردات Fjords**: وهي مداخل للبحر في اليابسة شديدة الانحـدار. توجـد في مناطق خطوط العرض العليا حيث تكون فيها الجبـال متاخمـة للمحيطـات، مثـل النرويج والآسكا وكولومبيا البريطانية وشيلي ونيوزلندا.

يعتقد بعض المتخصصين في الدراسات الجليدية أن الفيوردات ما هـي إلا أوديـة جليدية قديمة قد طغت عليها مياه البحر. كما يعتقـد آخـرون بأنهـا أوديـة جليديـة استطاع الجليد أن يعمقها كثيراً إلى ما دون سطح البحر. إذ يمكن لجليديـة شـاطئية سماكتها (٣٠٠) متر ووزنها النوعي (٠,٩) أن تستمر بالحت تحـت سـطح البحـر، حتى تصل إلى عمق (٢٧٠) متراً، وهو العمق الذي تبدأ فيه بالطفو. وبهـذا يختلـف حت الأنهار الجليدية عن الحت النهري، بـأن عملياتهـا الحتيـة تستمر تحـت البحـر حتى تصل إلى أعماق تبدأ فيها بالطفو، بينمـا يتوقـف الحـت النهـري عنـد وصـول النهر إلى البحر.

**د - الصخور الغنمية Roches moutonnées**: وهي صخور ناتئة في قاع الوادي الجليدي، تمتاز بسطحها الأملس وبشكلها المنحني الذي يشبه ظهور الغنم. وهي في

الأصل كتلة صخرية قاسية بارزة في قاع الوادي الجليدي، لم يستطع الجليد ازالتها فاندفع فوقها بقوة الضغط التي تحركه واحتك بها احتكاكاً قوياً، فإذا بلغ أعلى نقطة فيها انحدر عليها من جديد. ولذا يتميز سطح هذه الكتل الذي يواجه الجليد المتدفق، بانحداره القليل وسطحه الأملس المتحزز. أما السطح بعد الذروة فيتميز بانحداره الشديد وتجعده وعدم صقله (شكل ٥ـ٢٥). وتستعمل هذه الظاهرة حين وجودها لمعرفة اتجاه حركة الجليديات.



**شكل ٥ـ٢٥: الصخور الغنمية في سنترال بارك Central Park في مدينة نيويورك.**

## رسوبات الجليديات:

تدعى جميع الرسوبات التي تتوضع مباشرة من الجليديات أو بشكل غير مباشر بوساطة مياه انصهارها المتدفقة في مجارٍ مائية، أو المتجمعة في بحيرات، أو التي تتوضع مباشرة من الجبال الجليدية الطافية في البحار بالرسوبات المنجرفة drift sediments. وذلك لأن هذه الرسوبات انجرفت إلى مكانها الحالي بفعل الجليد بصرف النظر عن

طريقة أو مكان أو شكل تجمعها.

تتميز الرسوبات المنجرفة عن غيرها من الرسوبات بأنها نتجت عن تكسير واقتلاع وسحج وسحق الصخور بوساطة الجليديات، ولا يوجد فيها أثر للتجوية الكيميائية. يمكن أن نميز في هذه الرسوبات نوعين رئيسين وهما:

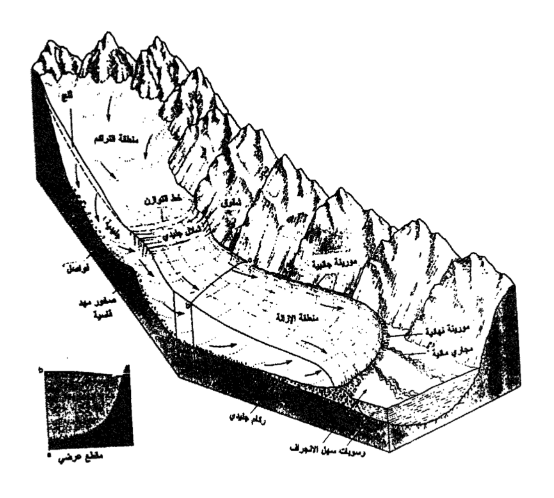
١ـ الركام الجليدي Till وهي رسوبات غير مطبقة وعديمة الفرز، مؤلفة من مواد تتراوح في حجومها من السلت والرمل إلى الحصى والجلاميد الصخرية الضخمة. ويظهر في معظم الأحوال على الحصى والجلاميد سطوح بري مستوية على شكل أوجه، يظهر عليها مجموعة أو أكثر من التحززات الطولانية المتوازية، وقد تشكلت هذه الأوجه من تماس القطع الصخرية الموجودة في قاعدة الجليديات مع الصخور التي يتدفق فوقها الجليد. وجميع المواد الرسوبية الحصوية والأخشن منها والمتطاولة يكون لها توجيه، حيث يكون محورها الأعظمي مساير لاتجاه تدفق الجليدية.

٢ـ رسوبات مطبقة ترسبت من الماء الناجم من انصهار الجليديات.

## ١ـ الركام الجليدي

**أ ـ المورينات Morains**: وهي رسوبات ركامية تتوضع على امتداد جوانب وقاع ونهاية الجليديات ذات التدفق النشط (شكل ٥ـ٢٦). ويمكن أن نميز منها المورينات النهائية أو الجبهية terminal morains، التي تتراكم على امتداد مقدمة الجليدية عند تعرضها للذوبان. وتكون هلالية الشكل بسبب تحدب اللسان الجليدي، لتفاوت سرعته بين جزئه الأوسط والجوانب. ويكون لهذه الرسوبات الهلالية منخفض مركزي على شكل المدرج، يدل على مراحل تقهقر الجليدية. أما المورينات الأرضية ground morains فتتألف من الرواسب الهائلة التي تتركها الجليدية في قاع واديها بعد ذوبانها، وتتميز بأنها رسوبات شديدة النعومة بسبب طحنها بوساطة ثقل الجليدية وضغطها على القاع. أما الركام الجليدي الذي يتكون في جانبي الجليدية فيعرف بالمورينات الجانبية lateral morains. وتتألف مواد هذه

الرسوبات من المفتتات الصخرية التي تسقط من جدران الـوادي الجليـدي وجوانبـه الناجمة من التجوية الميكانيكية. وقد يتشكل احياناً بـين المورينـات الجانبيـة وجـدار الوادي الجليدي بعض البحيرات الصغـيرة. ويمكـن أن ينجـم مـن التحـام جليديتـين مورينات متوسطة medial morains، وتتميز بـأن توضعاتهـا تكـون علـى شـكل خطوط متوازية توجد في أسفل المرتفعات، وقد تُشكل أودية لجريـان الميـاه الناجمـة من الذوبان.




شكل ٥-٢٦: مقطع طولاني في جليدية الوداي يبين المظاهر الرئيسة لها ورسوباتها.

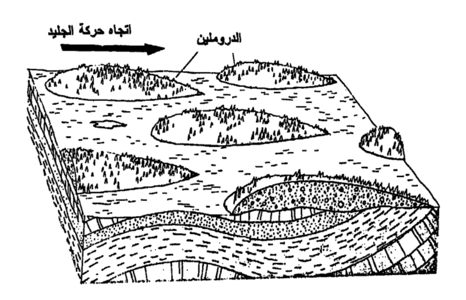
ب ـ الجلاميد التائهة **Erratic boulders**: قد تكون الجلاميد والكتل الصخرية الموجودة في رسوبات الركام الجليدي تنتمي إلى صخور المهد التي تستند إليها، إلا أن الكثير منها يكون منقولاً من مصادر بعيدة ومختلفاً تماماً عن الصخور الواقعة تحتها، لذلك توصف بالتائهة. وإن وجود هذه الكتل الصخرية التائهة كان من أول الظواهر التي أعتمد عليها في افتراض وجود نشاط جليدي قديم. ولا تقع جميع الكتل والجلاميد التائهة دائماً ضمن رسوبات الركام. فبعضها موجود على سطح الأرض بشكل إفرادي، وقد يصل وزنها أحياناً إلى ألوف الأطنان، وحجوم كهذه لا يمكن لأي تيار مائي أن ينقلها. ويلاحظ في بعض مناطق الجليديات القديمة وجود أعداد من الجلاميد التائهة التي تنتمي في أصلها إلى صخور مصدر مميزة، وعندما تُوقع أماكنها على الخرائط يلاحظ توزعها بشكل مروحي رأسه في منطقة صخور المصدر، فهي تشير إلى مصدرها، كما يعكس توزعها نمط تدفق الجليد القديم، إن مثل هذه المجموعات تُميّز باسم قافلة الجلاميد التائهة **erratic boulder trains**. وقد استفيد من توزع قافلة الجلاميد التائهة في كندا في التنقيب عن التوضعات الفلزية الموجودة في صخور المصدر.

حـ ـ الدروملين **Drumlin**: يكثر وجودها في المناطق المتاخمة للحواف الخارجية للغطاءات الجليدية القديمة. وتظهر على سطح الأرض في هيئة تلال انسيابية متوازية بيضوية الشكل، تمتد محاورها الطويلة في اتجاه سير الجليدية.

يصل طول الدروملين إلى نحو الكيلومتر، ويتراوح ارتفاعها من (١٥ـ٥٠) متراً، ويواجه الجانب المنحدر لها اتجاه قدوم الجليدية، بينما يشير الجانب الأطول ذو الانحدار الأقل إلى اتجاه حركة الجليد شكل (٥ـ٢٧).

توجد الدروملين عادة في مجموعات تعرف بحقول الدروملين **drumlin fields**. وإن إحدى هذه المجموعات الموجودة في روشيستر في ولاية نيويورك تحتوي نحو (١٠,٠٠٠) دروملين. أما منشؤها فغير معروف، ولكن اصطفافها في اتجاه سير الجليدية ومظهرها الانسيابي يوحي بأنها تقولبت في نطاق التدفق اللدن ضمن جليدية متحركة. ويعتقد أن كثيراً منها تكوّن بتقدم الجليد فوق رسوبات متوضعة

سابقاً فجرفتها وقولبتها.




شكل ٥ـ٢٧: الدروملين: تبدو تناظرية وذات شكل بيضوي إلى حد ما عندما ينظر إليها من الأعلى. بينما تبدو لا تناظرية وذات جانب شديد الانحدار في اتجاه تقدم الجليدية.

## د ـ الرسوبات الجليدية البحرية

وهي رسوبات جليدية توضعت مباشرة من الجليد العائم في البحر، سواء أكان من الرفوف الجليدية أم من الجبال الجليدية. وهي تشبه رسوبات الركام الجليدي من ناحية تحررها من الجليد المنصهر وتراكمها المباشر، إلا أنها تختلف عنها في بعض الخصائص، فالحبات الصخرية المتطاولة تتوضع على قاع البحر بدون أي توجيه، كما يمكن أن تحتوي على مواد عضوية أو بقايا كائنات بحرية. وحيث يكثر انفصال الجبال الجليدية يرتفع معدل ترسيبها، وقد يؤدي ذلك إلى تشكل طبقة على قاع البحر. وحين تساقط هذه الرسوبات على قيعان بحرية ذات رسوبات ناعمة، فإن الحصى والجلاميد تنغرز فيها وتشوهها، ويطلق عليها اسم حجارة التساقط dropstones وهي من الظواهر المميزة للرسوبات الجليدية البحرية.

توجد رسوبات مشابهة للركام الجليدي وليس لها علاقة بالنشاط الجليدي، وهي رسوبات الكولوفيوم ورسوبات انزلاقات الأراضي. فقد تبدو لأول وهلة كأنها ركام جليدي من حيث انعدام التطبق والفرز، ولكنها تخلو من الحصى والجلاميد ذات الأوجه المستوية المحززة بمجموعات من الخطوط المتوازية التي تميز الركام الجليدي.

## ٢ـ الرسوبات الجليدية المطبقة:

وهي رسوبات جليدية تترسب من المياه الجارية داخل الجليدية أو على سطحها أو في هوامشها، ومن تيارات المياه المتدفقة من مقدمة الجليدية. وتتميز هذه الرسوبات بتطبقها وفرزها، وتتراوح في حجومها من مواد بحصية رملية إلى سلتية غضارية جيدة الفرز. ويعتقد أن هذه الرسوبات تشكلت في جليدية عديمة الحركة، حيث يحصل فيها انصهار سريع يؤدي إلى نقصان كبير في سماكة الجليدية. وتعمل المياه الناجمة من انصهار الجليد والتي تنساب من فوقه ومن تحته وبداخله إلى نقل المواد المفتتة وتوضعها على شكل رسوبات مائية فوق أو داخل أو في هوامش الجليدية، وباستمرار انصهار الجليد وتراجعه تهبط هذه الرسوبات إلى القاعدة الصخرية وتعطي أشكالاً من الرسوبات المطبقة، وتكون على شكل تلال متنوعة في الشكل والحجم (شكل ٥ـ٢٨) وتدعى هذه الرسوبات برسوبات الكيم Kames sediments ورسوبات الاسكرز Eskers sediments.

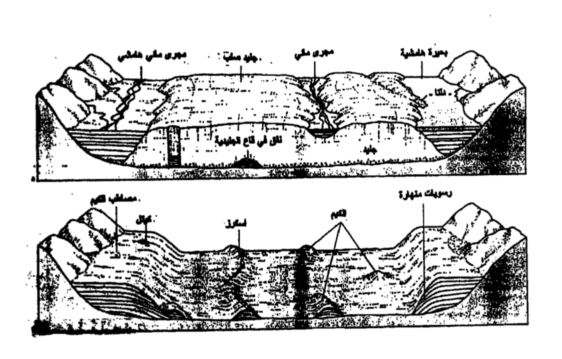
**أ ـ رسوبات الكيم:** وهي تلال منعزلة شديدة الانحدار موزعة بشكل عشوائي، يصل ارتفاعها إلى نحو (١٢) متراً، وتتألف من جلاميد وحصى ورمال وغضاريات.

تتكون الكيم في الحفر الموجودة على سطح جليدية عديمة الحركة أو في داخلها، حيث تصب فيها المياه الجارية الناجمة من الذوبان وتوضع حمولتها على شكل رسوبات بحيرية مطبقة.

أما إذا كانت الجليدية من نوع جليديات الوديان، فتكوّن مصاطب على جانبي الوادي على شكل شريطين رسوبين طبقيين ضيقين ما بين جدار الوادي والجليدية كما هو واضح في الشكل (٥ـ٢٨).

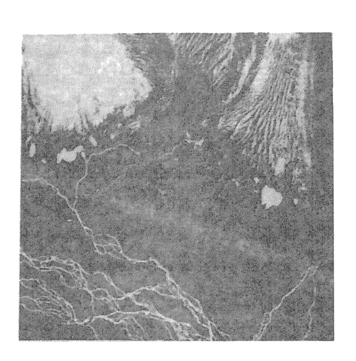
**ب ـ رسوبات الاسكرز:** تظهر رسوبات الاسكرز على شكل تلال متعرجة يصل ارتفاعها إلى (١٥) متراً وأحياناً إلى (١٠٠) متر، وتمتد لمسافة تتراوح بين أجزاء الكيلومتر إلى بضع مئات من الكيلومترات.

تتألف الاسكرز من رسوبات مطبقة من الرمل والحصى ذات شكل بيضوي أو مدورة مما يدل على أنها رسوبات جليدية حملتها مياه الأنهار التي كانت تجري تحت الجليدية أو في داخلها ثم أعادت توزيعها وترتيبها. ويبدو أن تدفق مياه هذه الأنهار كان مضطرباً بشكل لا يسمح بترسيب المواد الغضارية.




**شكل ٥ـ٢٨: رسم تخطيطي يوضح تشكل الرسوبات المطبقة الناجمة عن انصهار الجليدية.**

**حـ ـ رسوبات سهل الانجراف Outwash plane deposits**: وهي مشتقة من الركام الجليدي جرفتها مياه الإنصهار بعيداً عن الجليدية. فمجاري هذه المياه تنقل كميات كبيرة من الركام الجليدي، فعندما تعبر هذه المجاري حاجز المورين النهائي تنخفض سرعتها فجأة، وترسب الجزء الأكبر من حمولتها السريرية البحصية والرملية، مما تضطر مياه المجاري المائية لأن تنقسم إلى شبكة من المجاري المائية عند تحركها من الجليدية (شكل ٣ـ١٨). لذلك نجد لهذه الرسوبات صفات مماثلة لصفات الرسوبات النهرية. وغالباً ما تكون حرة الحركة بحيث تشكل سهلاً من رسوبات الانجراف، ومثالها رسوبات الانجراف من الهوامش الخارجية للقبعة الجليدية في ايسلندا (شكل ٥ـ٢٩). وبالمقابل عندما تكون مياه انصهار الجليد تجري داخل وديان فإن رسوباتها تكون محصورة ضمن هذه الوديان بحيث تملؤها جزئياً. وعند تقهقر الجليدية تزداد كمية المياه المتدفقة وتبدأ بحت الرسوبات السابقة وبذلك تكشف عن مصاطب نهرية جليدية في الوديان التي شهدت تكرار النشاط الجليدي.



**شكل ٥ـ٢٩: صورة جوية تُظهر مجاري مائية مضفورة في رسوبات الانجراف في ايسلندا وقد شكلتها مياه ذوبان جليدتين متجاورتين.**

تتميز بعض رسوبات سهل الانجراف ومصاطب الكيم بوجود منخفضات دائرية تعرف بالكيتل Kettle. ويعود تشكلها إلى انصهار كتلة ضخمة من الجليد كانت مغروزة في الرسوبات. وقد يصل قطر هذه المنخفضات إلى نحو (١٠) كيلو مترات في ولاية مينيسوتا Minnesota الأمريكية، كما يتراوح عمقها من (١٠-١٥) متراً. وفي كثير من الحالات تمتليء هذه المنخفضات بالمياه وتتحول إلى بحيرات أو برك مائية إذا كانت قليلة العمق (شكل ٥-٢٨).

## أسباب تشكل الجليديات

تدل ملاحظة الجليديات الحالية ودراسة مظاهرها، على أن وجودها في الماضي كان أوسع نطاقاً مما هو عليه في الوقت الحاضر، كما تشير إلى أنها تقدمت وتراجعت عدة مرات خلال الزمن الجيولوجي الماضي. ورغم المعطيات الكثيرة المتوافرة فلا يمكننا التوصل إلى شرح تشكل الجليديات بشكل مقنع، إلا أنها يمكن أن تساعدنا اقتراح أسباب لتشكلها. فالسجل الجيولوجي يوفر لنا المفاهيم الأساسية التي يمكن الاعتماد عليها وأهمها التالي:

١ـ تطابق التشكل الجليدي مع مراحل تطور مساحات قارية واسعة ومرتفعة. فقد كانت القارات خلال معظم الزمن الجيولوجي أخفض مما هي عليه الآن، وأدى ذلك إلى حدوث تجاوزات بحار ضحلة فوق حواشيها، ومثل هذه الشروط لا تلائم النشاط الجليدي.

ومنذ عدة ملايين من السنين وحتى الآن ازداد معدل ارتفاع القارات، حيث أصبح خلال الفترة الجليدية الأخيرة من البليستوسين أعلى بما يقرب من (٥٠٠) متر من معدل ارتفاعها خلال الكينوزوي الأوسط. وقد تزامنت عصور جليدية أخرى مع مراحل وجود قارات مرتفعة.

٢ـ لا يمكن أن ينسب التشكل الجليدي إلى التبرد التدريجي طويل المدى للأرض، إذ إن العصور الجليدية الكبرى قد تحققت عدة مرات خلال الزمن الجيولوجي. وهذه الدورات من النشاط الجليدي قد تحققت بظروف غير عادية،

لأن المناخ العام للأرض كان خلال معظم الزمن الجيولوجي غير مناسب للجليديات.

٣ـ إن تقدم وتراجع الجليديات كان يحدث على نطاق عالمي. وقد دلت نتائج التأريخ بالكربون ($C^{14}$) أن فترات تقدم الجليديات في أمريكا الشمالية هي نفسها في أوربا. يضاف إلى ذلك الملاحظات التي تشير إلى تراجع عام في الجليديات يحدث في الوقت الحالي على نطاق العالم.

إن تطابق النشاط الجليدي مع تطور كتل قارية مرتفعة يستدعي الافتراض أن ارتفاع القارات هو السبب الرئيس في حدوث النشاط الجليدي، وهذا ما يتفق عليه معظم الباحثين. والتعليل بسيط جداً لأن البليستوسين مميز بحدوث أربع دورات جليدية على الأقل تتخللها فترات بين جليدية دافئة. فإذا كانت هذه الدورات الجليدية ناجمة من ارتفاع اليابسة، فإن ذلك يعني نهوض وهبوط القارات عدة مرات خلال فترة زمنية محدودة جداً ولا يوجد دليل على ذلك، وكل ما يمكن قوله هو أن العمليات الجيولوجية التي حدثت خلال ملايين من السنين، وأدت إلى رفع القارات ببطء قد اوصلت ارتفاعها إلى حد يجعل من تغيرات المناخ شروطاً مناسبة لتشكل الجليديات، وحدوث فترات بين جليدية. فإذا كان ذلك صحيحاً فيجب أن نبحث بالاضافة إلى السبب الجيولوجي عن سبب مناخي يؤدي للتجلد. وبما السبب الرئيس المباشر لتشكل الجليديات هو استمرار تساقط الثلوج حتى في أشهر فصل الصيف، أي تغير شروط أشهر الصيف لتصبح أكثر برودة وأكثف غيوماً. ففصول الشتاء ليست أكثر برودة مما هي عليه الآن، كما أن البرودة الزائدة لا تناسب تساقط الثلوج. وعلى ذلك يفترض في تشكل الجليديات تحقق فصول صيفية زائدة البرودة والرطوبة.

أما تغيرات المناخ فيقترح لها عدة أسباب نذكر منها:

١ـ تغيرات في الطاقة الحرارية الشمسية.

٢ـ تغيرات في مقدار الطاقة الحرارية الشمسية التي تصل إلى سطح الأرض بعد اختراق الغلاف الجوي.

٣ـ تغيرات في علاقة الأرض بالشمس.

٤ـ تغيرات في نمط دوران الماء في البحار والمحيطات. مع العلم أن كل هذه الأسباب لا يمكن قبول واحد منها بشكل مقنع. لذلك يجب القول إن دراسة الجليديات تخلق مشكلة جيولوجية صعبة الحل.

# الفصل السادس

# الرياح والصحارى

إن الرياح والصحارى اسمان يقترن بعضهما مع بعض. وان هذه العلاقة تُترجم أحياناً بأنها علاقة سبب وتأثير. فالصحارى هي مساحات جرداء أو تقريباً جرداء بسبب معدل الأمطار المنخفض، واليابسة مجردة من النباتات والرطوبة التي تمسك التربة، حيث تأتي عليها الرياح وتُعريها. وفي بعض الصحارى أمثلة نموذجية عن تأثيرات الرياح فيها، ومنها يمكن أن نكوّن فكرة عن الترابط بين الرياح والصحارى.

## أنواع الصحارى

يوجد ثلاثة أنواع من الصحارى، فالأول يعزى إلى حركة الرياح على الأرض، التي تحصل في أحزمة الضغط العالي في المناطق تحت المدارية، وتدعى غالباً بالصحارى المدارية tropical deserts. فالرياح في هذه المناطق تكون لها حركة هبوطية، ومع هبوطها تصبح ساخنة أكثر فأكثر وتصبح قادرة على حمل الرطوبة، ولكن هذه الرطوبة غير كافية لسقوط المطر. ولهذا فإن مناطق اليابسة الواقعة تحت مثل هذه الأحزمة الجوية تكون صحراوية. ومن أمثلتها صحراء كالاهاري

Kalahari في جنوب أفريقيا وصحارى أواسط استراليا وصحراء سونوران Sonoran في المكسيك والولايات المتحدة والصحراء العربية وصحراء التشيلي Chile والبيرو Peru.

أما النوع الثاني من الصحارى فهو صحارى ظل المطر rain - shadow deserts وهي أصغر من النوع الأول ومحلية، وتوجد حيث تحجز سلاسل الجبال الغيوم الحاملة للمطر، وتدفعها للارتقاء إلى الأعلى، وهذا الصعود يجعلها في مجالات جوية باردة تؤدي إلى هطول حمولتها المطرية في جانب السلاسل الجبلية المقابلة للرياح، وتشكل ظل مطري في الطرف الآخر من هذه السلاسل. وإن صحارى الحوض العظيم Great Basin في نيفادا Nevada ويوتا Utah من هذا النوع، باعتبار أنها واقعة في جانب الظل المطري لسلسلة جبال سيرا نيفادا Sierra Nevada (شكل ٦-١).

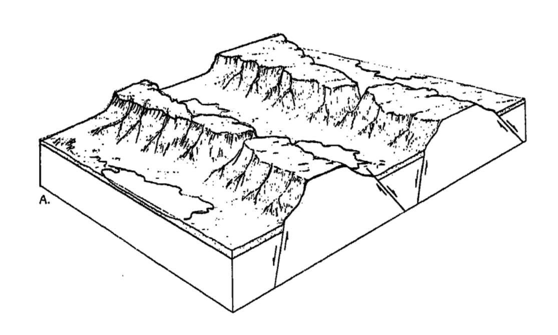


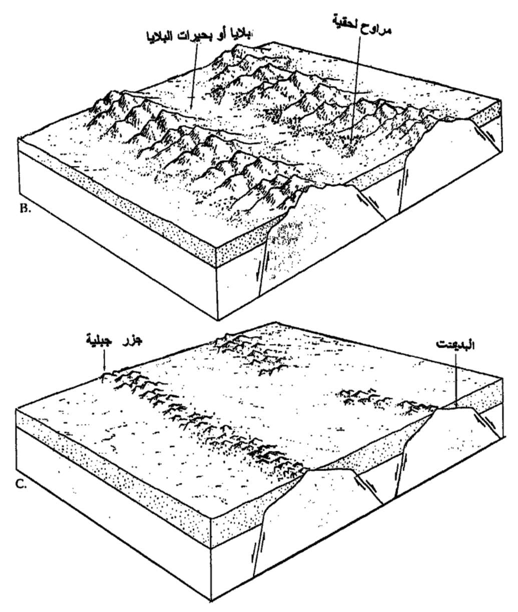

**شكل ٦-١: يوضح تشكل صحارى ظل المطر في غرب الولايات المتحدة.**

أما النمط الثالث من الصحارى فهو صحارى المناطق الموجودة داخل القارات، حيث تؤدي حرارة الصيف وجفاف الشتاء إلى انعدام الأمطار، مثالها صحارى أواسط آسيا مثل صحراء غوبي Gobi، حيث تمنع سلسلة جبال الهيمالايا رياح الصيف الموسمية المحملة بالهواء الرطب من المحيط الهندي من الوصول بعيداً داخل القارة.

## طبوغرافية الصحارى Deserts topography

إن أهم سمة في المنـاطق الصحراويـة هـي أن أنهارهـا لا تغادرهـا، إذ إن المعـدل العالي للتبخر والتسرب المياه داخل الأرض تفرغ الأنهار من مياههـا باستثناء نهـري الكولورادو والنيل، وكلاهما له تدفق كاف لتجـاوز التبخـر والتسـرب، وكلاهمـا يصب في البحر. وتجدر الإشارة إلى أن منابع هذيـن النهريـن تقـع في منـاطق جبليـة مرتفعة ذات رطوبة عالية، فهما لا يمثلان الأنهـار الصحراويـة النموذجيـة. ونتيجـة بالجريان الداخلي internal drainage في المناطق الصحراوية، فإن منتجات التجوية لا تنقل وتبقى لتملأ الأماكن المنخفضة، وهذا ما يعطي المناطق الصحراوية مظاهرها المميـزة، حيـث نجـد ذرى الجبـال في مثـل هـذه المنـاطق ترتفـع فـوق سـطوح ذات انحدارات لطيفة. وخير مثال على ذلك نذكر الصحـارى الجبليـة الحوضيـة في بـلاد المكسيك وغربي الولايات المتحدة. حيث يوجـد مـا يقـارب مـائتي سلسـلة جبليـة صغيرة يتراوح ارتفاعها من ٩٠٠م ـ ١٥٠٠م فوق مستوى الأحواض التي تفصل ما بينها (شكل ٦-٢).






**شكل ٦-٢: مراحل تطور المظاهر الطبيعية في الجبال الصحراوية. تتناقص التضاريس باستمرار عملية حت الجبال والترسيب في الأحواض. A - مرحلة مبكرة. B - مرحلة متوسطة. C - مرحلة متأخرة.**

نلاحظ من الشكل أن بعد مرحلة نهوض السلاسل الجبلية، تتساقط الأمطار على السفوح حافرة لنفسها مجاري عميقة (خوانق)، والمواد التي يتم حتها تُحمل بالمياه وتوضعها عند مخارجها من المنطقة الجبلية مشكلة مراوح لحقية **alluvial fans**

تتوزع فيها الحطاميات على شكل مثلث رأسه عالية الخانق وقاعدته نحو الأسفل ومع مرور الزمن يمكن للمراوح اللحقية المتجاورة أن تتوسع وتتلاقى لتشكل غطاءً حصوياً واسعاً يعرف بالباهادا Bajada، ونادراً ما تكون المياه كافية لتخترق الباهادا إلى وسط الحوض.

ولكن أحياناً تؤدي الأمطار الموسمية التي تهطل بغزارة لفترات قصيرة، إلى توافر كميات من المياه الجارية كافية لأن تخترق الباهادا، وتتجمع في بعض المنخفضات لتشكل بحيرات البلايا Playa lakes، وتكون ضحلة ومؤقتة تدوم بضعة أيام أو بضعة أسابيع. وتترك هذه البحيرات بعد جفافها رسوبات تتألف من السلت والغضار التي حملتها المياه من الباهادا. ويحدث هذا حين يكون قاع البحيرة نفوذا. أما حين يكون كتيماً فإن مياه البحيرة تبقى فترة أطول لتتعرض للجفاف بالتبخر تاركة رسوبات ملحية.

وبعد مرور أزمنة حتية طويلة مع ما يرافقها من عمليات ترسيبية، فإن التضاريس تستمر في الاضمحلال شيئاً فشيئاً، وتصبح الجبال مدفونة تحت أنقاضها، ولا يظهر منها سوى نتوءات صخرية كبيرة وسط أراضي قليلة الانحدار وتعرف بالجزر الجبلية Iselberg.

حين نتصور مقطعاً يمر من قمم الجبال إلى الأراضي المنخفضة، نجد أنه يتألف من ذرى حادة (الجبال المدفونة) وذات انحدار يتراوح بين ١٥ درجة و٦٠ درجة، وكثيراً ما يبدو على شكل جرف رأسي. ثم يليه سفح جبلي ذو انحدار متدرج يتراوح بين نصف درجة وسبع درجات. وفي واقع الأمر يتألف هذا السفح الجبلي من قسمين: قسم علوي تكوّن بفعل عوامل الحت ويعرف بالبديمنت pediment، ويبدو على شكل مقعر إذا نظرنا إليه من منطقة الحوض، وكثيراً ما يغطي هذا القسم طبقة رقيقة من الرسوبات المؤلفة من الجلاميد والحصى. ويعود الشكل المقعر إلى أن مياه السيول التي تنحدر على سفوح المرتفعات لها قدرة كبيرة على الحت لسرعة تدفقها وما تحمله من مواد مفتتة. ويؤدي هذا إلى حت هذه السفوح واعطائها الشكل المقعر الذي يميز البديمنت. أما القسم السفلي فتكّون بفعل عملية الترسيب وهو الباهادا الذي ينتهي إلى البلايا.

# الفعل الجيولوجي للرياح

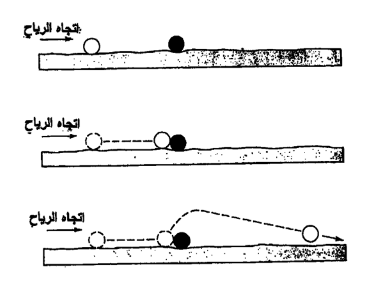
لا بد في مجال دراسة الغلاف الجوي من الاهتمام بالرياح كعامل جيولوجي حتي وترسيبي. ويمكن ملاحظة ذلك حين مرور عاصفة غبار، أو حين رؤية عصف رملي حملته هبة رياح قوية، أو ترسيب كميات كبيرة من المواد الغبارية والرملية. يشمل الفعل الجيولوجي للرياح عمليات النقل والبري (أو الحت) والترسيب.

## نقل الرياح للرسوبات

تستطيع الرياح المتحركة رفع المواد الحطامية غير المتماسكة، ونقلها من مكان لآخر، وتزيد سرعتها كلما زاد ارتفاعها عن سطح الأرض، فهي تنقل المواد الخشنة على شكل حمولة أرضية bed load، والمواد الناعمة على شكل معلقات. وإن نقل الرسوبات بوساطة الرياح يختلف عن نقلها بوساطة المياه الجارية. فالرياح ذات كثافة أقل من الماء، لذلك تكون قدرتها على نقل المواد الخشنة أقل، وإن حركتها غير محددة بأقنية، فهي تنتشر على مساحات واسعة وارتفاعات مختلفة في الغلاف الجوي.

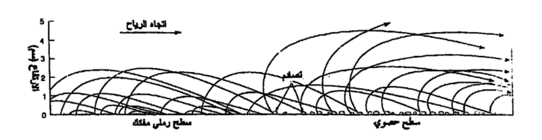
آ ـ **الحمولة الأرضية:** تتحرك الرياح عادة بشكل مضطرب، فهي تتحرك للأعلى وللأسفل وبالاتجاهات الجانبية، وإلى الأمام والخلف بشكل عشوائي. ويساعد هذا الاضطراب على تحريك الحبات الحطامية، فالحبات الكبيرة أو ذات

الكثافة العالية تتحرك بملامسة السطح بالدحرجة، والحبات الرملية تنتقل بوساطة القفز saltation على السطح. وقد أظهرت التجارب المخبرية التي أجريت على رمال تحركها تيارات هوائية ضمن أنفاق زجاجية، أن حبات الرمل تتحرك في مسارات منحنية. فقد وجد أن حبيبات الرمل تبدأ بالحركة عند وصول الرياح إلى سرعة تكفي للتغلب على عطالتها inertia، فتتدحرج على الأرض حتى تصطدم بحبة أخرى وتؤدي إلى قفزها بالهواء، وتدفعها الرياح إلى الأمام إلى أن تهبط ثانية بفعل الثقالة gravity. فعند اصطدامها بالأرض إما أن ترتد ثانية في الهواء أو تضرب بحبات أخرى تؤدي إلى قفزها في الهواء (شكل ٦-٣).




شكل ٦-٣: يوضح مراحل رفع الحبيبات الرملية بالرياح.

وهكذا في وقت قصير تبدأ سلسلة من القفزات لتدفع بكمية كبيرة من الرمال إلى الحركة، مشكلة سحابة من الرمال بالقرب من سطح الأرض (شكل ٦-٤).



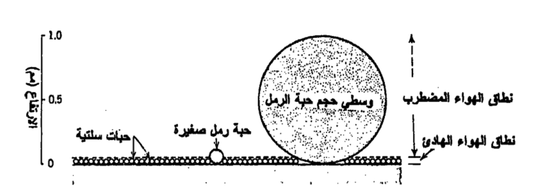

شكل ٦ـ٤: الحركات القفزية لحبات الرمل.

دلت الملاحظات المخبرية والحقلية أن حبات الرمل المتنقلة بالقفز لا تنتقل بعيداً عن سطح الأرض. ففي المناطق الصحراوية والظروف العادية ترتفع الحبات إلى نحو نصف متر، أما في حالة الرياح القوية جداً، فإن ارتفاعها لا يتعدى المتر، هذا كما دلت عليه آثار الحت الريحي في أعمدة الأسوار والأعمدة الكهربائية، وأعمدة الآثار التي تقع في نطاق المناطق المعروفة بأحواض الغبار dust bowls [1] .

**ب ـ الحمولة المعلقة Suspended load:** تشمل المواد الغبازية الناعمة كالسلت والغضار، التي تحركها الرياح وتحملها على شكل معلقات إلى ارتفاعات تصل إلى عدة آلاف من الأمتار في الغلاف الجوي. وقد تبقى معلقة لمدة طويلة نسبياً، وذلك لأن الغبار بصورة عامة يتكون من جزئيات مفلطحة ذات مساحة سطحية كبيرة بالنسبة إلى وزنها، وإن اضطراب الهواء يعمل على معادلة قوة الثقالة، مما يؤدي إلى بقائها معلقة في الهواء. وتكون سرعة تحركها قرب سطح الأرض بطيئة جداً. وتنعدم بملامسة السطح لوجود نطاق رقيق من الهواء الراكد بمحاذاة السطح تبلغ سماكته ميليمتراً أو أقل، وتتغير هذه السماكة حسب وجود العوائق كالحجارة والنباتات، مما يؤمن للمواد المعلقة الغضارية والسلتية نطاقاً هادئاً

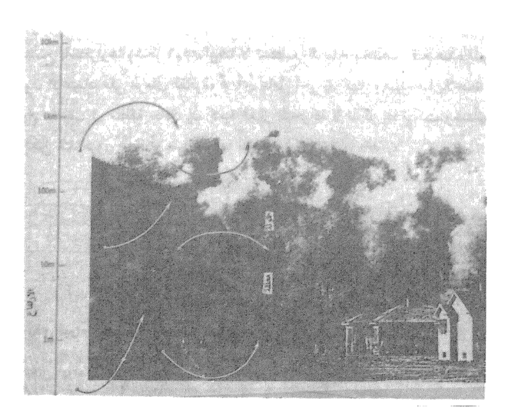
(١) منطقة كثيرة الجفاف والعواصف الغبارية.

يسمح باستقرارها (شكل٦ـ٥). وهنا لا تستطيع الرياح وحدها رفع هذه المواد دون الاعتماد على الرمال القافزة، أو أيُ عامل آخر يحركها. وهذا ما يلاحظ في يوم عاصف في منطقة جافة، إن كمية الغبار المتحركة لا تذكر إذا تركت وشأنها. ولكن عند مرور عربة أو سيارة فإنها تثير سحابة كثيفة من الغبار.




شكل ٦ـ٥: تشكل حبيبات السلت الناعمة سطحاً رقيقاً ضمن الطبقة الهوائية الساكنة، التي سببتها حبات الرمل وغيرها من العوائق. ولا يتجاوز سمكها $\frac{١}{٣٠}$ من القطر الوسطي لحبات الرمل.

بالرغم من أن المواد المعلقة تتوضع عادة بالقرب من مصادرها. إلا أن الرياح القوية قادرة على نقل كميات كبيرة من المواد الغبارية لمسافات بعيدة. وأحسن مثال لذلك عواصف الثلاثينيات من هذا القرن، التي اجتاحت وسط الولايات المتحدة. فقد قدرت الحمولة الغبارية التي كانت عالقة بالجو بـ ٣٥,٠٠٠طن/كم$^{٣}$، ووصلت لارتفاع نحو ٣,٦ كم فوق سطح الأرض، ونقلتها الرياح بعيداً عن مصادرها بمسافة تقدر بـ ٣٠٠٠كم (شكل ٦ـ٦).



**شكل ٦ـ٦: عاصفة غبارية اجتاحت وسط الولايات المتحدة في ٢١ مايس عام ١٩٣٧. وقد دامت هذه السحابة الغبارية السوداء لمدة ثلاثين دقيقة.**

## الحت الريحي Wind erosion

تعد الرياح أكثر العوامل إسهاماً في تشكيل سطح الأراضي في المناطق الصحراوية وشبه الصحراوية، ومما يساعد هذا العامل على الحت هو ندرة النبات وقلة رطوبة الهواء. ولكن يجب أن لا ننسى أن المياه الجارية على الرغم من ضآلتها تشترك بنصيب لا بأس به في تغيير معالم سطح الأرض في الأقاليم الصحراوية. يتمثل العمل الحتي للرياح بطريقتين هما: التذرية deflation والبري abrasion.

### أ ـ التذرية

هي عملية رفع وإزالة المفتتات من سطح الأرض تمهيداً لنقلها، وقد لا تلاحظ آثار الحت بالتذرية، لأن رفع وإزالة المواد يتم من السطح بكامله في آن واحد. فمثلاً العواصف التي اجتاحت غرب الولايات المتحدة في الثلاثينيات من هذا القرن،

أدت إلى انخفاض السطح بمقدار متر واحد خلال بضع سنوات (شكل ٦ـ٧).



**شكل ٦ـ٧: أكمة من التربة القديمة، تشير إلى وضعية سطح الأرض قبل تأثير التذرية. وقد قامت جذور النباتات بحماية التربة القديمة من عمل الرياح الحتي.**

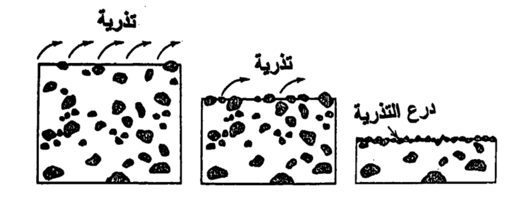
بما أن الرمال تتحرك بالقفز، وتكون على مقربة من سطح الأرض، فإن اصطدامها بالأرض يعد عاملاً مهماً في الحت، وينتج عن ذلك تكوين منخفضات في الصخور غير المتماسكة تعرف بأحواض النفخ blowout basins.

إن من أكثر الدلائل وضوحاً على تذرية الرياح وجود آلاف من الأحواض، التي حفرتها الرياح في السهول العظمى Great Plains في شمال أمريكا.

تأخذ هذه الأحواض أشكالاً طولية باتجاه الرياح، وقد يصل امتدادها إلى نحو كيلو مترين، أما عمقها فيتراوح من متر إلى مترين. تغطي منطقة الأحواض هذه رسوبات لحقية يمكن تذريتها بسهولة، إلا أن عمل التذرية فيها لا ينشط إلا في السنوات الجافة، أما في السنوات الرطبة فتغطيها الأعشاب وتحميها. أما الأحواض التي تتشكل في المناطق الجافة فتصل إلى أعماق أكبر، كما هو الحال في منخفض القطارة Qattara Depression في الصحراء الليبية المصرية حيث يصل عمقه إلى

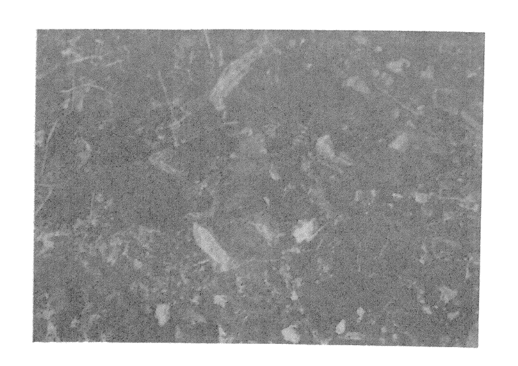
(١٠٠) متر تحت سطح البحر.

إن العمل الحيّ للتذرية يستمر في حفر الأحواض وتعميقها حتى يصل إلى منسوب الماء الجوفي، حيث تحد الرطوبة ونمو الأعشاب من استمرار عملية الحت. وكذلك تطور غطاء من الحصى كبيرة الحجم نتيجة التذرية يقف عائقاً أمام الحت، فالرياح تستطيع أن تنقل المواد الغبارية والرمال من السطح، وتترك وراءها المواد الأكبر حجماً، وبمرور الزمن يتشكل غطاء واقٍ من قطع صخرية مزواة، يحمي سطح الأرض من استمرار عملية الحت يعرف بدرع التذرية deflation armor (شكل ٦-٨).




شكل ٦-٨: ثلاث مراحل من تطور درع التذرية.

تعرف أحياناً هذه الطبقة السطحية برصيف الصحراء desert pavement، لأن رفع المواد الناعمة بشكل مستمر بوساطة الرياح يجعل الحصى في أوضاع مستقرة وملائمة لترتصف بجانب بعضها بعضاً (شكل ٦-٩).

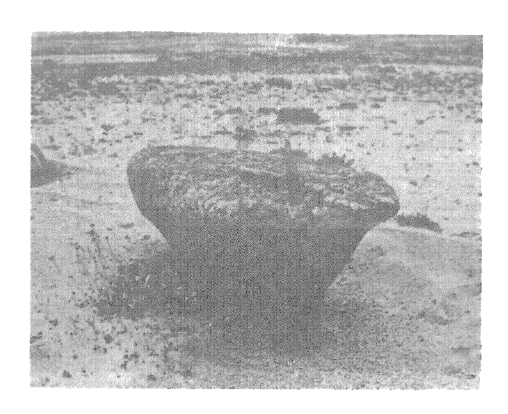


**شكل ٦-٩: رصيف الصحراء يتكون من حصى مزوّى.**

## ب ـ البري

تتوقف عملية بري الصخور على سرعة الرياح وما تحمله من مواد مفتتة من جهة وطبيعة الصخور ووضعية الطبقات من جهة ثانية.

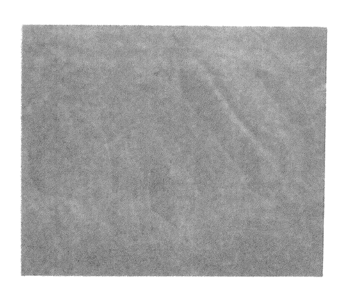
يتم البري من ضرب الحبات الرملية القافزة التي تحركها الرياح. ومن النادر أن ترتفع الحبات الرملية القافزة لأكثر من متر واحد فوق سطح الأرض، وعادة يبقى معظمها متحركاً في نصف المتر السفلي. لذلك يكون معظم الفعل الحتي للعصف الرملي sand blasting محصوراً ضمن نطاق لا يزيد ارتفاعه على سطح الأرض أكثر من نصف متر. ويؤدي بري الصخور إلى تشكل هيئات صحراوية مميزة مثل الموائد الصحراوية والسطوح الصخرية المقعرة، والاهتراء في الأجزاء السفلية من الجدران الصخرية والأعمدة والآثار القديمة.



**شكل ٦ـ١٠: يوضح تشكل الموائد الصخرية في صخور غرانيتية. نتيجة بري الرياح لأجزائها السفلية.**

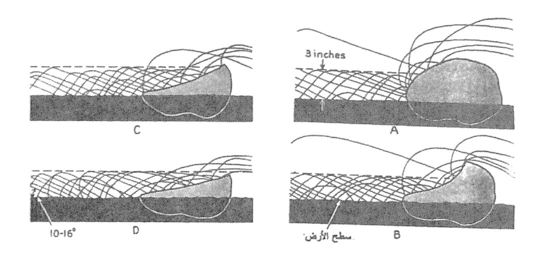
**الموائد الصخرية:** عندما تصطدم الرياح المحملة بالرمال بأرض صخرية ناتئة مؤلفة من طبقات أفقية متفاوتة في قساوتها، فإن حت الطبقات اللينة يكون بنسبة أكبر من الطبقات القاسية، فيتكون نتيجة لذلك صخور ارتكازية **pedestal rocks** قاسية ترتكز على صخور لينة تأخذ شكل نبات الفطر وتعرف عادة بالموائد الصخرية (شكل ٦ـ١٠).

**الياردانج Yardangs:** وهي مرتفعات متطاولة ومتوازية مؤلفة من صخور رسوبية قاسية، ويكون لها شكل قارب مقلوب، يصل امتدادها إلى عشرات الكيلومترات وترتفع إلى نحو (١٠٠) متر. وتوجد عادة في مجموعات وتتشكل في مناطق صحراوية مؤلفة من طبقات مائلة متفاوتة في قساوتها، فتتشكل نتيجة الحت الريحي المتفاوت خوانق عميقة تُحفر في الصخور اللينة تفصلها أعراف حادة ذات أشكال غريبة (شكل ٦ـ١١). تعرف هذه الأشكال في الصحراء الأسيوية بالياردانج.



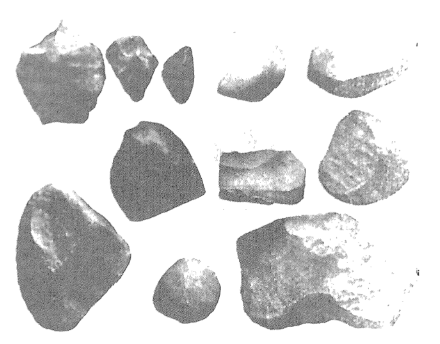
شكل ٦-١١: الياردانج.

من الحقائق المعروفة أن الحصى في المناطق الصحراوية تكون ملساء ومنقرة وذات حواف حادة ومتعددة الأوجه. وهذا يعود إلى اصطدام الرمال المحمولة بالرياح لها، وبري الوجه المقابل للرياح وجعله مدوراً ومنقراً (شكل ٦-١٢).




شكل ٦-١٢: مراحل بري الرياح للحصى الصحراوية.

وقد يكون للحصى أكثر من وجه مصقول وذلك لتغيير اتجاه الرياح، أو لانقلاب الحصى لسحب الرمال من تحتها بفعل التذرية (شكل ٦-١٣).



شكل ٦-١٣: الأشكال المختلفة للحصى الريحية.

## الرسوبات الريحية

تلعب الرياح دوراً مهماً في الترسيب في المناطق الجافة والسواحل الرملية في العالم. وهي تقوم بدور كبير في فرز المواد الخشنة عن الناعمة، وينتج من عملية الفرز sorting نوعان من الرسوبات وهما: الرسوبات الرملية ورسوبات اللوس.

### ١- الرسوبات الرملية

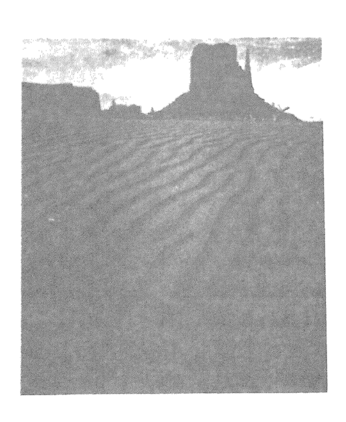
عندما تنخفض سرعة الرياح تنخفض قدرتها على حمل المواد ونقلها، وعندها تبدأ عملية الترسيب. وتعتمد هذه العملية والظواهر المختلفة الناتجة منها على حجم وكمية المواد المنقولة وعلى وجود النباتات وعلى اتجاه هبوب الرياح. وبصورة عامة

نميز بين نوعين من الرسوبات الرملية:

أ ـ رسوبات ذات أهمية محدودة وتنتشر على نطاق ضيق مثل التموجات الرملية.

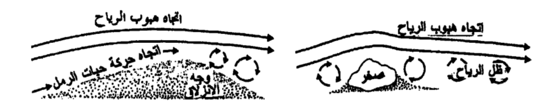
ب ـ رسوبات تظهر على نطاق واسع في المناطق الصحراوية. وتتمثل بالكثبان الرملية بأشكالها المختلفة.

**أ ـ التموجات الرملية Sand ripples**: وهي غطاءات من الرمال المفروزة بشكل جيد. وتتمثل في تموجات ripples أو حافات ridges تظهر بين حين وآخر على سطح الرسوبات الرملية. وتتكون في المناطق التي تكون فيها الرمال غزيرة والرياح منخفضة السرعة. حيث تنتقل الرمال الناعمة بالقفز تاركة وراءها الرمال الخشنة، وباستمرار قفز الحبات الناعمة تتطور تموجات أو حافات من الرمال الخشنة وتكون عمودية على اتجاه هبوب الرياح (شكل ٦ـ١٤). ولكن لا تلبث أن تتلاشى في حالة وجود رياح قوية وتختلط الرمال الناعمة بالخشنة. وليس لمثل هذه الرسوبات أية دلالة جيولوجية.



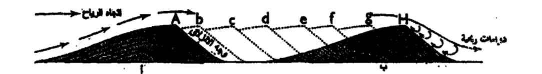
**شكل ٦ـ١٤: التموجات الرملية**

**ب ـ الكثبـان الرمليـة** عندمـا تصطـدم الريـاح المحملـة بالرمـال بعـائق كصخـرة أو شجيرة فإنها تلتف حوله وأمامه تاركة نطاق ظل خلفه، ونطاق ظـل أصغـر أمامـه، حيث تتحرك الرياح فيهما بشكل دوامات وبسرعة أقل مما حولها (شكل ٦ـ١٥). وبانخفاض سرعتها تنخفض طاقتها على حمل الرمال وتوضعها في نطاق الظل، ومـع زيادة التراكم ينطمر العائق ويتشـكل حـاجز في طريـق الريـاح، وباسـتمرار هبـوب الرياح ووجود مصدر كافٍ للرمال، تترسب الرمال أمـام وخلـف الحـاجز مشـكلة كثيباً رملياً.




**شكل ٦ـ١٥: تشكل الكثيب الرملي.**

يأخذ الكثيب Dune الرملي شكلاً غير متناظر، إذ يكون له انحـدار خفيـف في اتجاه الرياح من (٥ـ١٢) درجة، وأشد انحداراً في الجانب المعـاكس. حيـث تتحـرك الرمال صاعدة الجانب المقابل للرياح بالقفز، وبعـد القمـة مباشـرة تنخفـض سـرعة الرياح وتسقط الرمال في الجـانب الآخر وتـتراكم عليـه بـانحدار يقـرب مـن (٣٤) درجة، وهي زاوية الاستقرار للرمال غـير المتماسـكة، ويعـرف هـذا الجـانب بوجـه الانزلاق slip face. وهو يشير إلى اتجاه الرياح الـتي شـكلت الكثبـان. وباسـتمرار تراكم الرمال وانزلاق بعضها على هـذا الوجـه يـؤدي إلى هجـرة الكثيـب في اتجـاه حركة الرياح (شكل ٦ـ١٦).

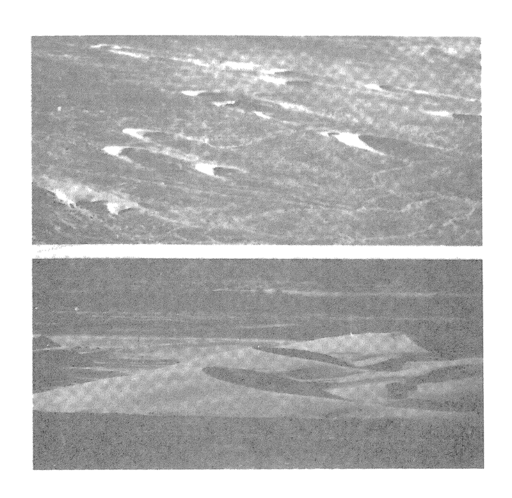



شكل ٦-١٦: مقاطع توضح نمو وهجرة وتطبق الكثيب الرملي.
أ - بنية الكثيب الثابت.
ب - بنية الكثيب بعد هجرته.

كما هو واضح في الشكل عندما ترسبت الرمال على وجه الانزلاق شكلت طبقات تميل في اتجاه هبوب الرياح. تعرف هذه الطبقات المنحدرة بالطبقات المتقاطعة cross beds. وعندما تدفن الكثبان تحت طبقات أخرى وتصبح جزءاً من الصخور الرسوبية، فإن شكلها اللاتناظري يزول ولكن تبقى الطبقات المتقاطعة. ومن دراسة توجه هذه الطبقات يمكن للجيولوجين تحديد اتجاه التيارات الريحية التي شكلت الكثبان الرملية. وتستعمل هذه المعلومات مع معطيات أخرى لمعرفة المناخ خلال الزمن الجيولوجي الذي تشكلت فيه هذه الكثبان، وهذه بدورها تساعد على تحديد مواقع صفائح الغلاف الصخري في تلك الفترة.

## أنواع الكثبان الرملية:

**أ ـ الكثبان الهلالية:** عندما تتخذ الكثبان أشكالاً هلالية تعرف بالبرخانات Barchans،وتكون على شكل هلال يتجه جانبه المحدب إلى الجهة التي تأتي منها الرياح، كما يتجه طرفاه إلى الجهة التي تسير نحوها الرياح (شكل ٦ـ١٧). وكثيراً ما يتغير الشكل الهلالي إذا ما حدث أيُّ تغير في اتجاه الرياح، أو كانت المياه الجوفية قريبة من السطح، مما يساعد على نمو النباتات في أطرافها وتثبيتها، وعندها تتركز قوة الرياح في الجزء الأوسط وقد ينقسم إلى قسمين منفصلين يتحول كل منهما إلى رابية شبه مخروطية من الرمال.

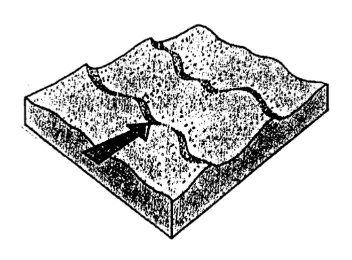


**شكل ٦ـ١٧: صورة تُظهر الكثبان الهلالية (البرخانات)، يكون الانحدار اللطيف في إتجاه هبوب الرياح.**

تتشكل البرخانات في المناطق المنبسطة وغير المغطاة بغطاء نباتي، والتي يكون فيها مصدر الرمال محدوداً، وتهاجر ببطء في اتجاه الرياح بمعدل يصل إلى (١٥) متراً في السنة، وهي بصورة عامة متوسطة الحجم وقد يصل أكبر ارتفاع لها نحو (٣٠)متراً وأقصى اتساع بين رأسيها نحو (٣٠٠) متر.

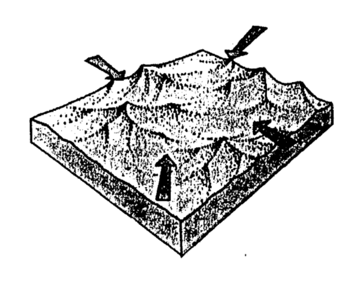
ب ـ **الكثبان الطولية:** وتعرف أحياناً بكثبان السيف seif dunes. وهي تلال طولية من الرمال تمتد موازية لاتجاه الرياح. وتتكون في المناطق التي تكثر فيها الرياح وتكون رمالها قليلة.

حـ ـ **الكثبان العرضانية:** تتشكل في المناطق التي تكون فيها الرياح قوية ومصدراً كافياً للرمال. فهي تشبه البرخانات إلا أنها تكون ملتوية، وتكون الكثبان في سلسلة طويلة على هيئة تلال تفصلها أغوار في اتجاه عمودي على اتجاه الرياح. وتكون معظم الكثبان الشاطئية من هذا النوع (شكل ٦ـ١٨).



**شكل ٦ـ١٨: الكثبان العرضانية. يشير السهم إلى إتجاه هبوب الرياح.**

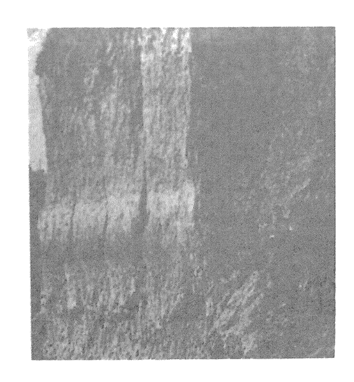
د ـ **الكثبان النجمية star dunes:** وهي هضبة منفردة من الرمال، تتألف من مجموعة من الحافات تتفرع من قمة مرتفعة باتجاه أسفل الهضبة، وقد يصل ارتفاع قممها إلى نحو (١٠٠) متر. يتشكل هذا النمط من الكثبان في المناطق التي تهب فيها الرياح من جميع الجهات شكل (٦ـ١٩).



شكل ٦ـ١٩: الكثبان النجمية. تشير الأسهم إلى اتجاه هبوب الرياح

## ٢ـ رسوبات اللوس Loess deposits

يطلق اسم اللوس على رسوبات ريحية غير متماسكة، يميل لونها إلى الرمادي أو الأصفر، وذات ملمس طحيني. تتألف من حبيبات ناعمة جداً من السلت والغضار. تكون رسوبات اللوس عادة عديمة التطبق، وتظهر تكشفاتها على شكل مقاطع شاقولية تتوضح على جانبي شق الطرقات (شكل ٦ـ٢٠). وإن هذا الميل لبقاء التكشف بانحدارات شديدة، قد يكون نتاج التجاذب الكهربائي بين الحبيبات الناعمة، أو من تشكل ملاط كلسي ضعيف أو من تضافر كليهما.



**شكل ٦ـ٢٠: تظهر تكشفات اللوس على شكل جدران عمودية.**

يتألف اللوس عادة من الكوارتز والفلدسبار والهورنبلاند والميكا والكالسيت وفلزات غضارية. وتكون حبيباتها زاويّة الأطراف، مما يؤدي إلى تشكل مسامية مفتوحة تصل إلى ٥٠٪. وإن وجود الماء مع المواد الفلزية المتنوعة يجعل ترب اللوس خصبة جداً. أما الصفات التي تشير إلى الأصل الريحي لترب اللوس فهي:

١ـ وجود مستحاثات لنباتات كانت تعيش على اليابسة، وكذلك وجود مستحاثات حيوانية ذات تنفس هوائي مثل الحلزون وبقايا الثور الوحشي والجمل والفيل.

٢ـ تشكل غطاءات لطبوغرافية غير نظامية، حيث توجد في المنحدرات والوديان والسهول، مما يدل على أنها ترسبت من الهواء مباشرة.

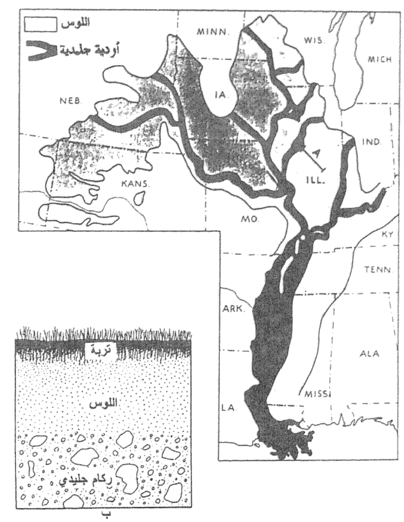
**مصادر ترب اللوس:** اعتماداً على الدراسات التي أجريت على تراكمات اللوس في الولايات المتحدة وفي شمال وغرب الصين، تبين أن للوس مصدرين رئيسين وهما

المناطق الصحراوية والمناطق الجليدية.

يعد اللوس الموجود في الولايات المتحدة وفي شمال فرنسا والحدود الشمالية الغربية للألب من نتاج غير مباشر للجليديات. وقد بينت الدراسات التي تمت في الولايات المتحدة الحقائق التالية:

١ـ يتألف اللوس من مواد ناعمة جداً تشبه الطحين الصخري.

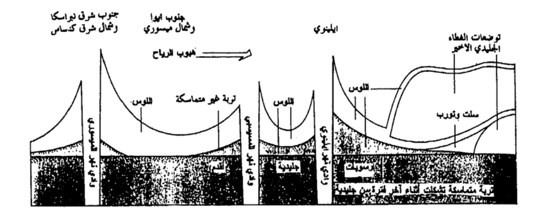
٢ـ تشير تكشفات اللوس في وسط وشمال الولايات المتحدة أنه توضع مباشرة فوق الركام الجليدي قبل تعرضه للتجوية الكيميائية (شكل ٦ـ٢١). وهذا يدل على أن رسوبات اللوس أتت من مصادر قريبة.




شكل ٦ـ٢١: أ ـ توزع اللوس في وسط وشمال الولايات المتحدة.
ب ـ توضع اللوس مباشرة فوق الركام الجليدي غير المجوى.

٣ـ تناقص سماكة وحجم الحبيبات المؤلفة لرسوبات اللوس بالابتعاد عن ضفاف الأنهار باتجاه الشرق (شكل ٦ـ٢٢).

٤ـ اختراق الأنهار لتوضعات اللوس في الجزء المركزي من الولايات المتحدة كما هو واضح في الشكل (٦ـ٢١).




**شكل ٦ـ٢٢: مقطع عرضي في توضعات اللوس في أعلى وادي الميسيسبي. حيث تكون أكبر سماكة وأكثر خشونة بالقرب من الأودية النهرية. وبخاصة في اتجاه هبوب الرياح. مما يشير أن الأودية كانت المصدر الأول لهذه الرسوبات.**

يمكن تفسير الظواهر السابقة بما يلي:

فأثناء العصر الجليدي البليستوسيني، نقلت الأنهار كميات كبيرة من المواد الجليدية، مما أدى إلى تشكل سهول فيضان بمساحات كبيرة. تتألف رسوباتها من الحصى والرمال والغضاريات. وقد تعرضت هذه الرسوبات إلى رياح غربية كنست الجزئيات الغبارية وحملتها باتجاه الشرق وأدت إلى أن تكون السماكة وحجم الجزئيات كبيرة بالقرب من الأنهار وصغيرة باتجاه الشرق. وشكلت مباشرة

غطاءات بسماكات مختلفة فوق الركام الجليدي قبل أن يتحوى.

أما رسوبات اللوس في شمال وغرب الصين فتتراوح سماكتها من (٣٠-١٠٠)متر وتغطي مساحات تقرب من (٨٠٠,٠٠٠) كيلو متر مربع. فقد دلت الدراسات على أن مصدر موادها من مناطق صحراوية (صحراء غوبي) وهي التي تعطي اللون المميز للنهر الأصفر والبحر الأصفر.

إن ترب اللوس هي من الترب المستحاثة المهمة التي مكنت العلماء من التعرف على تاريخ رسوبات الرباعي. فحين تتعرض تراكمات اللوس إلى مناخ رطب فإن الماء السطحي ينفذ فيها مؤدياً إلى فساد سطوحها الخارجية، وبالتالي إلى حل المواد الكلسية منها، ومن ثم تترسب هذه المواد مشكلة تخثرات كلسية تعرف بدمى اللوس loess dolls، وحين تتغير الشروط نحو الجفاف، تتغير حركة المياه المتغلغلة فيه باتجاه الأعلى حيث تعطي قشرة كلسية سطحية. أما في المناخ البارد والجاف، فإن تراكم اللوس يكون متجانساً دون التأثر بأعمال التحوية. لذلك حين نجد في رسوبات اللوس نطاقات متجانسة غير متأثرة بالتحوية، متناوبة مع نطاقات بحواة، فإن ذلك يدل على تعاقب فترات برودة أو فترات جليدية مع فترات بين جليدية دافئة. وبهذا تم التعرف على المناخ المسيطر في الفترات الجليدية وبين الجليدية خلال البليستوسين. وقد دعمت المعلومات التي قدمتها ترب اللوس دراسات تمت على رسوبات من أعماق بحرية تحتوي على أحياء ذات حساسية عالية للتغيير المناخي.

# الفصل السابع

# الفعل الجيولوجي لمياه البحار والمحيطات

## مقدمة عامة

المحيطات أحواض مائية ثابتة تشكلت منذ تصلب القشرة الأرضية، بينما تكون البحار أماكن منخفضة من اليابسة تغمرها المياه المالحة تارة فتظهر على شكل مسطحات مائية، وتنحسر عنها تارة أخرى فتتحول إلى أرض يابسة من جديد. أي أنها مناطق محدودة العمق تختلف تمام الاختلاف عن المحيطات. يكون العمق في بعض البحار بين (١٠٠ـ٢٠٠) م، بينما يصل عمق المحيطات إلى (٤٠٠٠ـ٦٠٠٠)م، وتنخفض حفرة الفيليبين في المحيط الهادي إلى عمق (١١٨٠٠م).

تشغل المحيطات والبحار نحو ٧٠,٨٪ من سطح الكرة الأرضية، أي ٣٦١ مليون كيلو متر مربع من ٥١٠ مليون كم$^2$ من المساحة الكلية. وبهذا تكون المساحة التي تشغلها المحيطات والبحار تقريبا أكبر من اليابسة بـ ٢,٥ مرة. ويجب أن يلاحظ أن توزع المياه واليابسة يختلف في نصف الكرة الشمالي عنه في النصف الجنوبي. ففي النصف الشمالي تشغل القارات ٣٩,٣٪ والمحيطات والبحار ٦٠,٧٪، بينما في النصف الجنوبي تنخفض فيه نسبة القارات إلى ١٩,١٪ وترتفع

نسبة المحيطات إلى ٨٠,٩٪، ولهذا السبب يدعى نصف الكرة الشمالي بالقاري والجنوبي بالمحيطي.

تقدر حجم كتلة المياه التي تتركز في البحار والمحيطات بـ ١,٣٢٠,٠٠٠,٠٠٠ كيلومتر مكعب. وتكون هذه الكتلة في حركة مستمرة وتحت تأثير فعل متبادل بينها وبين الأراضي المحيطة بها. إن مياه البحار والمحيطات موطن لحيوانات ونباتات مختلفة، ومستقر لرسوبات حطامية وكيميائية منقولة اليها من اليابسة بوساطة عوامل النقل المختلفة (انهار - جليديات - رياح).

إن الفعل الجيولوجي لمياه البحار والمحيطات هو مجموعة مركبة من العمليات المتبادلة التي تضم تحطيم وتفتيت الصخور، ونقل المواد الصلبة والمنحلة إلى الأحواض المحيطية، ثم تراكم الرسوبات. والعملية الأخيرة لها أهمية كبيرة.

منذ مئات السنين من تاريخ الأرض، كان سطح اليابسة مغطى بمياه البحر، وخلالها تراكمت رسوبات بسماكات كبيرة أدت إلى تشكل طبقات من الصخور الرسوبية في الجزء العلوي من القشرة الأرضية. وإن مساحة اليابسة تحت الصخور الرسوبية تشكل نحو ٧٥٪ من السطح الكلي للقارات، وإن نحو ٥٠٪ منها صخور غضارية و٣٠٪ رملية و٢٠٪ صخور كربوناتية، بالاضافة إلى البقايا العضوية المحفوظة فيها. تقدم لنا دراسة هذه الصخور وثائق أولية تاريخية لمعرفة تاريخ القشرة الأرضية والشروط الجغرافية الطبيعية القديمة، واعادة بناء العالم العضوي. وعلاوة على ذلك يوجد مع الصخور الرسوبية معظم الفلزات المفيدة مثل الغاز والبترول، وخامات الحديد والمغنيزيوم، والفوسفات وغيرها من المواد الاقتصادية الهامة.

سوف ندرس في هذا الفصل العمل الجيولوجي لمياه البحر: العمل الحتي من جهة، والعمل الترسيبي من جهة أخرى. ويتأثر هذا العمل المزدوج بعدد من العوامل الفيزياكيميائية والبيولوجية والتكتونية التي سنبدأ قبل كل شيء بدراستها.

## ١ـ العوامل الفيزياكيميائية والبيولوجية

### آ ـ درجة الحرارة

إن درجة حرارة المحيطات عامل من العوامل الفيزياكيميائية التي تلعب دوراً مهماً في عمليات الترسيب. ويتحدد توزع حرارة المياه السطحية للمحيطات بعدد من العوامل مثل:

١ـ درجة حرارة التسخين الناتج من الأشعة الشمسية.

٢ـ حركات الرياح.

٣ـ التيارات المحيطية التي تنقل المياه بدرجات حرارة مختلفة.

وقد لوحظ تناقص منتظم في درجات الحرارة ابتداء من المناطق الاستوائية باتجاه المناطق القطبية. وقد سجلت أعلى درجات الحرارة للمياه السطحية لمحيطات المناطق الاستوائية (نحو ٢٧° و٢٨°) مئوية وأخفض درجات الحرارة في المناطق القطبية (دون الصفر). وبهذا تنزلق كتل المياه الباردة تحت الكتل المائية الدافئة للبحار المعتدلة والاستوائية لكثافتها العالية نسبياً. وتحل هذه التيارات كميات كبيرة من الغازات، مما يسبب تهوية مستمرة للوسط البحري، وتسمح بالحياة في الأعماق السحيقة.

إن جميع التغيرات في درجات حرارة مياه المحيطات والتي تتعلق بالتمنطق المناخي، تحدث فقط في الطبقات العليا وحتى عمق (١٠٠ـ٢٠٠) م، بينما تتراوح درجة الحرارة في الطبقات القاعية في جميع المحيطات بين (-١,٣° و٣°) مئوية، وتهبط دون الصفر في مناطق خطوط العرض العليا.

وقد تضطرب التغيرات المنتظمة في درجات الحرارة مع العمق، في بعض الأماكن، بتيارات مؤدية إلى إزاحة كتل مائية ضخمة في اتجاه أفقي. وتوجد هذه الشروط النوعية الحرارية في المحيط المتجمد الشمالي، حيث تكون درجة حرارة المياه السطحية تحت درجة الصفر حتى عمق (١٠٠) م، وأحياناً تصل إلى عمق (٢٠٠ـ٣٠٠) م، ثم ترتفع درجة الحرارة فتصبح فوق درجة الصفر حتى عمق

(١٥٠٠) م، وبعدها تنخفض ثانية إلى ما دون درجة الصفر. ويفسر وجود طبقة دافئة بين طبقات المياه الباردة بسبب تيار الخليج الدافئ، حيث تكون مياهه أكثر ملوحة وأثقل فتغوص تحت المياه السطحية العذبة لحوض المحيط المتجمد الشمالي.

### ب ـ الضوء

يخترق الضوء المياه البحرية إلى أعماق تتراوح بين (٥٠ـ١٠٠) م وقد يصل إلى أعماق أكبر في المياه الصافية، مما يساعد على نمو النباتات في المناطق قليلة العمق.

### حـ ـ الضغط

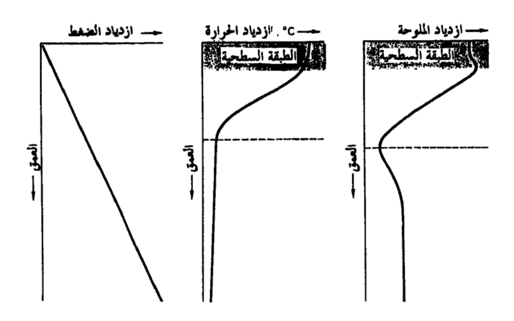
يزداد ضغط توازن المياه ضغطاً جوياً واحداً كل عشرة أمتار. لذلك يكون الضغط مرتفعاً في الحفر المحيطية العميقة، مما يكسب الماء بعض اللزوجة ويحل كمية كبيرة من الغازات، وهذه لها أهمية كبيرة في عمليات الترسيب العضوي.

### د ـ نسبة الأملاح

تحتوي جميع المياه الطبيعية على أملاح معدنية بنسب مختلفة. وتبلغ النسبة الوسطية للأملاح في مياه البحار والمحيطات (٣,٥٪). وتعد هذه النسبة الثابتة إلى حد ما صفة مميزة لمياه المحيطات، ما عدا الطبقات السطحية منها حتى عمق (١٠٠ـ٢٠٠) م حيث تتعرض الملوحة إلى تغيرات محصورة بين (٣,٢٪ ـ ٣,٧٪) تبعاً للمناطق المختلفة. ففي المناطق الجافة، حيث الأمطار قليلة والتبخر له أهميته، ترتفع نسبة الملوحة في الطبقات السطحية على عكس المناطق الرطبة تماماً، حيث تؤدي الأمطار الغزيرة إلى انخفاض نسبة الملوحة.

ويكون تأثير الشروط المناخية أكثر وضوحاً في البحار القارية. ففي بعض البحار ترتفع ملوحة المياه أو تنخفض بنسبة كبيرة عن مياه المحيطات، كما هو الحال في البحر الأحمر، الذي يقع في منطقة حارة وجافة ومحاط بأراض صحراوية، ترتفع نسبة الملوحة فيه إلى (٤,١٪ - ٤,٣٪). وبالمقابل توجد بحار أخرى تتراوح نسبة الملوحة فيها بين (١,١٪ - ٢,٠٪)، كما هو الحال في بحر آزوف والبحر الأسود

لكثرة الأنهار التي تصب فيها. تؤثر الملوحة في كثافة المياه، وهذا يؤدي إلى نوع من التطبق المائي بحسب درجة الملوحة (شكل ٧ـ١).




شكل (٧ـ١): تغيرات الضغط والحرارة والملوحة مع ازدياد العمق في المحيطات.

**التركيب الكيميائي:** تحتوي مياه البحار والمحيطات على عدد كبير من المواد المنحلة، أهمها الكلوريدات (NaCl ، MgCl2)، وتليها الكبريتات (MgSO4، K2SO4، CaSO4)، والكربونات (MgCO3 ، CaCO3). أما بقية المواد فتكون بنسب قليلة. تكون عادة هذه المواد على شكل ايونات موجبة وسالبة مبينة في الجدول التالي:

| النسبة المئوية | الكمية غ/كغ | الايونات |
|---|---|---|
| ٣٠,٦١ | ١٠,٧٦ | $Na^+$ |
| ٣,٦٨ | ١,٣ | $Mg^{2+}$ |
| ١,٦ | ٠,٤٠ | $Ca^{2+}$ |
| ١,٠٢ | ٠,٣٨ | $K^+$ |
| ٠,٠٣٩ | ٠,٠١ | $Sr^{2+}$ |
| ٥٥,٠٤ | ١٩,٣٥ | $Cl^-$ |
| ٧,٦٨ | ٢,٧ | $SO4^{2-}$ |
| ٠,٤١ | ٠,١٤ | $HCO3^-$ |
| ٠,١٨ | ٠,٠٦٥ | $Br^-$ |
| ٠,٠٠٤ | ٠,٠٠١ | $F^-$ |

جدول ٧-١: يبين التركيب الملحي لمياه البحار والمحيطات.

إن جميع النسب السابقة ثابتة تقريبا ما عدا ايون الكلسيوم ($Ca^{++}$) فإنها متغيرة ويرجع ذلك إلى طبيعة الأراضي المحيطة بالبحار وبسبب الاستهلاك البيولوجي لها.

**هـ - الغازات**

تحتوي مياه البحر بالاضافة إلى الأملاح النيتروجين، والاوكسجين وثنائي أوكسيد الكربون ونادرا كبريت الهيدروجين. وإن الاوكسجين وثنائي أوكسيد الكربون لهما أهمية جيولوجية كبيرة لكونهما من الغازات الفعالة كيميائياً، حيث تلعب دوراً مهماً في عمليات الترسب في الأحواض البحرية وفي عمليات الدياجينيز.

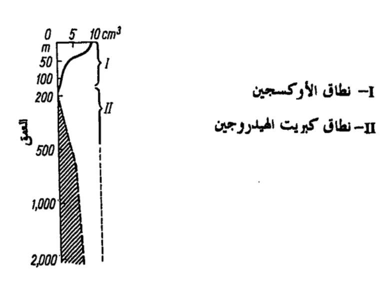
تأخذ مياه البحر الاوكسجين من الهواء ومن خلال التركيب الضوئي للنباتات البحرية، ويستعمل في تنفس الحيوانات البحرية وأكسدة المواد المختلفة.

تختلف نسبة الاوكسجين في مياه البحار والمحيطات باختلاف درجة الحرارة والضغط والملوحة. وتبلغ نسبته في المياه ذات الملوحة النظامية والدرجة الصفر ٨,٠٤ سم$^3$/الليتر، و٦,٤١ سم$^3$ بدرجة حرارة ١٠°، و٥,٥٣ سم$^3$ في الدرجة ٢٠°، وبهذا فإن حجم الأوكسجين المنحل في الماء يتغير بتغير الحرارة. ففي درجات الحرارة العالية (على أن يكون الضغط والملوحة ثابتين) تتشكل كميات كبيرة من الاوكسجين وينطلق الفائض منها إلى الغلاف الجوي.

وهكذا توجد علاقة ثابتة بين الغلاف الجوي والغلاف المائي. ففي الصيف تعطي المحيطات الاوكسجين للجو وفي الشتاء يحدث العكس. وتكون نسبة الاوكسجين مرتفعة في الأعماق القليلة لاختراقها الضوء وكذلك في الأعماق الكبيرة لوجود التيارات البحرية الشاقولية (التيارات الحملانية).

يوجد غاز ثنائي أوكسيد الكربون بكميات كبيرة في مياه البحر. ومصدره من الغلاف الجوي، ومياه الأنهار، وفعالية الحيوانات البحرية وينطلق أيضاً أثناء النشاطات البركانية تحت الماء. ويكون في مياه البحر على شكل حر، وجز منه متحداً كيميائياً بشكل كربونات وبيكربونات ويكون هنالك توازن بين الشكلين. فعندما ترتفع نسبة (CO2) في مياه البحر، تتشكل الكربونات المنحلة كما هو الحال في المياه الباردة، وتصل كميات غاز ثنائي أوكسيد الكربون إلى حدها الأقصى في الأعماق الكبيرة.

أما بالنسبة إلى غاز كبريت الهيدروجين فيقتصر وجوده على نطاقات الأعماق والبحار المتصلة بمياه المحيطات عبر ممرات ضيقة مثل البحر الأسود. فقد عرفنا سابقاً أن مياه هذا البحر مطبقة بسبب الملوحة، فمياه الطبقات العلوية العذبة والباردة لا تستطيع أن تغوص لأعماق كبيرة، لذلك فإن كمية الأوكسجين تكون طبيعية على عمق (٤٠ ـ ٥٠) م، ثم تأخذ بالتناقص مع العمق حتى تصل نحو ١٥٪ من نسبتها على عمق (١٥٠) م كما هو واضح في الشكل (٧-٢).




شكل (٢-٧) يوضح نسبة الاوكسجين وكبريت الهيدروجين في البحر الأسود.

ويؤدي هذا الافتقار للاوكسجين إلى ارجاع الكبريتات بوساطة البكتريات اللاهوائية وتشكل كبريت الهيدروجين، وترتفع نسبته بازدياد العمق حيث تصل في الأعماق إلى (٥-٦) سم$^{٣}$ في الليتر. وهذا النوع من الغاز يحدد نظام العالم العضوي وطبيعة تراكم الرسوبات في قاع البحار.

## ز ـ الحياة العضوية

إن البحر موطن لكثير من الحيوانات والنباتات التي تعتمد في تطورها وتوزعها على عدة عوامل منها: درجة الحرارة، الملوحة، حركة المياه، الضغط، نفوذ الضوء وبنية القاع. وبصورة عامة فإن نسبة وجود الكائنات الحية في المياه المالحة أعلى منها في المياه العذبة.

ويمكن أن تقسم العضويات البحرية، استناداً إلى موطنها وطريقة حياتها، إلى ثلاث مجموعات كبيرة:

١ـ العضويات القاعية أو اللاطئة Benthos

٢ـ العضويات الطافية أو المعلقة Planktons

٣. العضويات السابحة Nektons

**١ـ العضويات القاعية:** تعيش هذه الكائنات في قاع البحار مثل نجم البحر والحيوانات الطحلبية والاسفنجيات والاشنيات وبعض الرخويات والقنفذانيات Echinoids، وبهذا نلاحظ غنى وتنوع الحياة في الأعماق لوفرة الأطعمة النباتية هنالك.

**٢ـ العضويات الطافية:** إن هذه الكائنات عديمة الحركة لذلك تعيش معلقة بالمياه، وتنقلها الأمواج والتيارات البحرية. وهي تشمل عضويات حيوانية ونباتية، ومن بينها وحيدات الخلية الحيوانية التي لها أهمية كبيرة في تشكيل الرسوبات، مثل المنخربات foraminifera والشعاعيات Radiolaria ويضاف لها العضويات العائمة البتروبودا pteropods.

أما النباتات الطافية فنذكر منها الاشنيات algae كالمشطورات Diatomite والكوكوليت Coccoliths (من مجموعة السوطيات). ولجميع هذه الكائنات هياكل صلبة أما كلسية أو سيليسية.

**٣ـ العضويات السابحة:** تستطيع هذه الكائنات الحركة في الوسط المائي وتشمل الأسماك والزواحف المائية والثدييات. ويكون لهذه الكائنات هياكل فوسفاتية قابلة للانحلال أو الأكسدة في الأعماق، ولهذا تكون رديئة الحفظ.

تأخذ الكائنات العضوية أهمية جيولوجية كبيرة في العمليات التي تتم في المحيطات. إذ يحصل تفاعل متبادل بين الماء والعضويات، حيث تستعمل العضويات المركبات الموجودة في ماء البحر في بناء هياكلها، بالاضافة إلى أنها تمتص بعض الغازات وتطرح بعضها الآخر، وهي تؤثر بدورها في التغيرات الكيميائية لماء البحر.

وعند موت العضويات تتراكم في قاع البحار والمحيطات مختلطة بالرسوبات البحرية، وبالوقت نفسه يؤثر التفسخ العضوي في العمليات اللاحقة التي تحدث في الترسبات الطينية وفي الوسط المائي.

## ٢ـ العوامل التكتونية: الحركات النسبية للقارات والبحار

### أ ـ الحركات التكتونية

تكون القارة التي تأخذ بالنهوض مركزاً لحركة موجبة. كما هي الحال على طول شواطئ بحر البلطيق. وتشكل أحزمة الأرصفة المرجانية والشواطئ البحرية الناهضة إلى ارتفاعات مختلفة، الدليل على الحركات الموجبة القديمة (جزر المحيط الهادي). وتتعرض القارات أيضاً لحركات سالبة، وقد تبين الملاحظة وجودها، فعندما يهاجم البحر أراضي القارة يغمرها بمياهه، ويكون هكذا بحالة تجاوز.

### ب ـ الحركات التوازنية

سبق أن شرحنا من قبل طبيعة هذه الحركات. ولقد تم ربطها بتشكل الجليديات، وقد لعبت دوراً مهماً في تطور الشبكة المائية.

تؤدي الحركات التكتونية والتوازنية إلى انتقال نسبي لخطوط الشواطئ. ويعبر عن تقدم البحر وتراجعه بالتجاوز transgression والانسحاب regression. وإن إعادة بناء هذه التجاوزات والانسحابات هو موضوع الجيولوجيا التاريخية.

وبصرف النظر عن هذا الانتقال الذي هو من مرتبة عشرات أو حتى مئات الكيلومترات فإن خطوط الشواطئ هي موضوع تجدد محلي عائد للعمل الحتّي للبحر يكون هذا العمل الحتي ظاهراً بصورة خاصة على طول الشواطئ الصخرية.

## حركة المياه في المحيطات والبحار

إن حركات المياه في المحيطات والبحار متنوعة كثيراً، ولكن اصطلح أن تصنف تحت العناوين التالية أ ـ الأمواج، ب ـ المد والجزر، حـ ـ التيارات البحرية والمحيطية.

### أ ـ الأمواج

هي من أهم العوامل تأثيراً في المناطق الشاطئية، فالرياح هي العامل الأول في تكوين الأمواج. وهناك بعض الأمواج التي تسببها الهزات الأرضية والاندفاعات

البركانية التي تحدث في قاع المحيطات أو البحار. وقد تتشكل أمواج ذات حجوم كبيرة نتيجة للانزلاقات تحت البحرية. والذي يهمنا في هذا المجال هو الأمواج الناجمة من حركة الرياح.

فإذا هبت الرياح على سطح مائي احتكت بسطحه وساعدت على تكوين موجات صغيرة لا تلبث أن تزداد ارتفاعاً واتساعاً تبعاً لقوة الرياح وضغطها على جوانب الموجات، فتتحول بذلك الموجات الصغيرة إلى موجات كبيرة.

يقاس ارتفاع الموجه بالمسافة العمودية بين ذروتها وبطن الموجة التي تليها. فإذا كانت الرياح قوية بلغ ارتفاع الموجة (١٥) متراً، أما الأمواج العادية فيتراوح متوسط ارتفاعها من ٦ ـ ٩ أمتار.

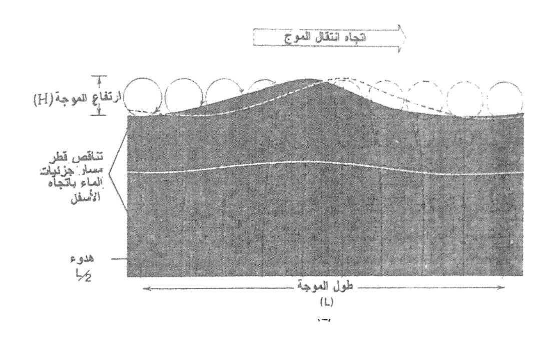
يقاس طول الموجة بالمسافة الأفقية بين ذروتها وذروة الموجة التي تليها، وقد يصل طولها إلى ٢١٠ أمتار وأحياناً إلى ٧٥٠ متراً إذا كانت الرياح قوية جداً.

كذلك يتوقف حجم الموجات، بالإضافة إلى سرعة الرياح، على عمق مياه البحر أو المحيط الذي تتولد فيه. فكلما ازداد عمق هذه المياه قلت اعاقة قاع البحر لحركة الأمواج وسرعتها.

لا تتأثر مياه البحار العميقة بفعل الرياح الا لعمق بسيط جدا لا يتعدى المستوى الذي يهبط إليه قاع الموجات. فإذا بلغت الموجات منطقة ساحلية ضحلة يقل عمقها عن ارتفاع الموجة تكسرت وأصبحت لمياهها قوة هائلة يكون لها مقدرة كبيرة على الحت والنقل.

**حركة الأمواج wave motion:** تتولد الأمواج في البحار والمحيطات من هبوب الرياح فوق سطوحها. ويبين لنا الشكل (٧ـ٣) كيف تتضاءل الأمواج تجاه الأعماق حين لا يوجد تأثير منها على القاع. أما حركة الموجة فتختلف تماماً عن حركة جزيئات الماء الموجودة في نطاقها. ويمكن تشبيه ذلك بحركة الرياح فوق حقل من الأعشاب أو القمح، حيث تنثني ثم تعود إلى وضعها السابق وتعطي شكلاً موجياً. وبطريقة مماثلة تمر الموجة في الماء وتحرك جزيئاته للأعلى والأسفل

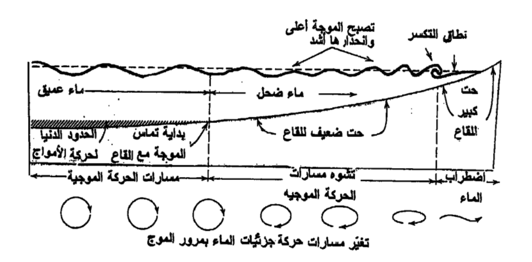
وتعيدها إلى وضعها السابق بدروة كاملة. وقد حددت هذه الحركة باثباتات نظرية واثباتات عملية تجريبية، عن طريق وضع أوعية زجاجية ملونة تطفو على سطح الماء وتصوير حركتها أثناء مرور الموج فيها بكاميرات سينمائية.




**شكل ٧ـ٣: حركة جزيئات الماء بمرور الموج.**

تستمد الأمواج طاقتها الحركية من الرياح الملامسة لسطح الماء، فهي آتية من السطح فقط،ويكون قطر مسار الجزيئات المائية المتحركة الموجودة على السطح معادلاً لارتفاع الموجة (شكل ٧ـ٣)، وتتضاءل الطاقة الموجية تدريجياً باتجاه الأسفل، أو بتعبير آخر تتناقص أقطار الحركة الدورانية باتجاه الأسفل حتى تتلاشى. وعندما يكون عمق الماء معادلاً لنصف طول الموجة ($\frac{L}{2}$) تتلاشى الحركة الدورانية. ومع أن أطوال الأمواج في المحيطات تكون في معظم الأحوال أقل من (٦٠٠) متر، إلا أنها حين تصل إلى هذه القيمة يصل تأثيرها إلى الأجزاء العميقة من الرفوف القارية، مما يؤدي إلى تحريك المواد الرسوبية الناعمة المستقرة على القاع للأعلى والأسفل وبالتالي تحركها على المنحدرات القارية باتجاه الأسفل.

أما ما يحدث في المياه البحرية الضحلة القريبة من الشواطئ فيكون أكثر سرعة ويجري في طريقة مختلفة، فعندما تصل الموجة إلى نطاقات أعماقها أقل من $(\frac{L}{2})$ فتصبح قاعدة الموجة على تماس مع القاع، ويتغير شكل الموجة وتصبح الحركة الدورانية لجزيئات الماء اهليلجية وذات سرعة أكبر، كما يؤدي تأثير القاع في الأمواج إلى تقصير طولها وازدياد ارتفاعها وإلى عدم تناظريتها، حيث يصبح لها مقدمة شديدة الانحدار. وبما أن مقدمة الموجة تكون في مياه عمق قاعها أقل من مياه جزئها الخلفي، فإنها تصبح ذات انحدار شديد يزداد تدريجياً حتى تنهار ويتبعها الجزء الخلفي، وهكذا تتكسر الأمواج قرب الشاطئ وتصبح حركتها اضطرابية (شكل ٧ـ٤). ويدعى نطاق النشاط الموجي الواقع بين بداية تكسر الأمواج وخط الشاطئ نطاق التكسر surf zone. وفي حال الأمواج الشديدة تضرب كل موجة صخور الشاطئ وتصعد مياهها للأعلى على السطوح الصخرية المائلة، حيث تتلاشى طاقتها الحركية وتعود المياه ثانية إلى البحر بطريقة غير نظامية ومعقدة، أما عودتها فتكون أحياناً على شكل تيارات مائية عريضة موازية للقاع، أو تجري ضمن أقنية محلية ضيقة، وإن مياه الأمواج العائدة للبحر يشعر بها السباحون وتعرف بتيارات تحت السطح undertow.




شكل ٧ـ٤: التغيرات التي تحدث للموجة عند تحركها إلى الشاطئ.

### ب ـ تيارات المد Tidal currents

تتشكل تيارات المد نتيجة الجذب المشترك للشمس والقمر للأرض، وتتجلى بتجاوز ماء البحر على اليابسة مرتين كل ٢٤ ساعة و٥٠ دقيقة.

كان نيوتن أول العلماء الذين اهتموا بدراسة المد والجزر، وهو صاحب نظرية الجاذبية التي تقول: إن أي جسمين يتجاذبان وتتوقف قوة الجذب على كتلة هذين الجسمين. فهي تتناسب طرداً مع الكتلة ($m$) وعكساً مع مربع المسافة بينهما ($d$):

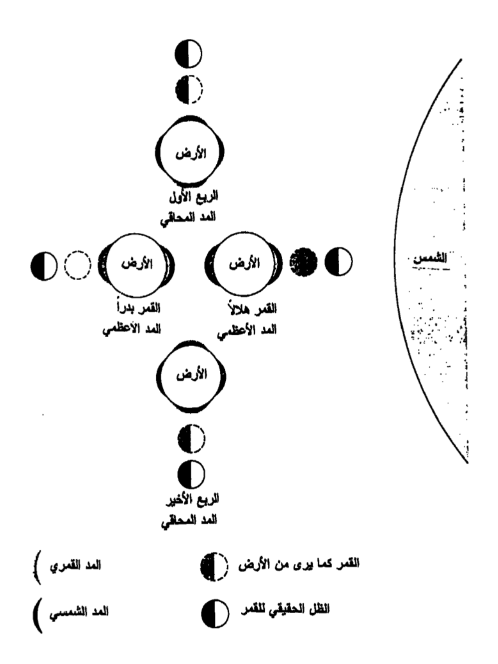
$$F = \frac{m1 \times m2}{d2}$$

وبتطبيق هذا القانون على القوة الناتجة من جذب الشمس والقمر للأرض تمكن نيوتن من شرح السبب في رفع مياه البحر وخفضها نتيجة للحركة المعروفة بالمد والجزر.

ولما كان القمر أقرب إلى الأرض بكثير، فإن قوة جذبه للأرض تفوق قوة جذب الشمس، رغم صغر حجمه بالنسبة للشمس. وينجم من ذلك أن المياه في القسم المواجه للقمر ترتفع إلى أعلى، حيث تعاكس قوة جذبة قوة الثقالة الأرضية. في حين أن القسم الآخر للأرض البعيد عن القمر تنخفض مياهه إلى أسفل لعدم تأثره بقوة جذب القمر وازدياد تأثره بالثقالة.

ولما كانت الأرض تدور حول محورها وحول الشمس فإنها تخضع لهذه القوة مرتين كل ٢٤ ساعة و٥٠ دقيقة.

وقد يتفق تأثير الشمس والقمر في عملية المد وقد يختلفان، وذلك حسب موقع الشمس والقمر من الأرض. فعندما يكون اتجاه القمر والشمس على مركز الأرض بزاوية صفر أو ١٨٠ درجة، فإن القمر والشمس يؤثران في حركة المد ويكون أعظمياً. وتحدث هذه الحالة مرتين في الشهر، عندما يكون القمر هلالا أو بدرا. أما عندما تكون الزاوية على سطح الأرض بين الشمس والقمر ٩٠°، فإن المد يكون أقل ما يمكن لأن قوة جذب القمر تنقص بمقدار الثلث (قوة جذب الشمس) ويطلق على المد في الحالة الأولى اسم المد الأعظمي Spring tide وعلى المد في الحالة الثانية اسم المد المحاقي Neap tide (شكل ٧ـ٥).




**شكل ٧ـ٥: تمثيل تخطيطي يوضح أطوار القمر وحصول المد الأعظمي والمد المحاقي.**

تختلف طبيعة المد والجزر من مكان لآخر ففي المحيط الأطلسي لوحظ أنه خلال اليوم يحدث مدان وجزران، أما في المحيط الهادي فيحدث مد واحد. وقد اكتشف أخيراً أن حركة المد والجزر ظاهرة اقليمية وليست عالمية. ويرجع هذا إلى دوران

الأرض حول نفسها وهي القوة التي تؤدي إلى أن تظل بعض المياه ثابتة في أماكنها.

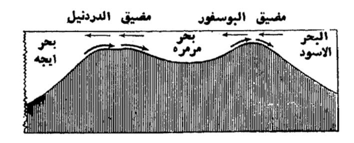
أما عن الفعل الجيولوجي لتيارات المد والجزر فليس له أثر يذكر في تشكيل السواحل. وقد يكون لها في بعض الأحيان سرعة تكفي لنقل المفتتات الصخرية وترسيبها في المناطق الشاطئية.

وقد لوحظ في المناطق التي تتأثر بموجات المد تفوق عملية الترسيب على عملية الحت، إذ ان قوة تيار المد لا تكون لها قدرة كبيرة على الحت. وقد تقوم عملية الجزر بعمل حتى إلى حد ما، وذلك لكون الجزر يسبب تزايداً كبيراً في سرعة مياه الأنهار التي توقفت تقريباً أثناء المد ويسحب عندئذ الوحل الذي توضع جزء منه بتماس المياه البحرية والمياه العذبة، وتتكشف مزاريب المصبات على أبعاد طويلة في المنطقة الساحلية.

## حـ - التيارات البحرية

تسبب الرياح التيارات البحرية وتختلف عن الأمواج بكونها كتلة متصلة من المياه تتحرك حركة مستمرة. وهكذا فإن رياح الاليزيه (في خليج ستريم) في شبه جزيرة فلوريدا تسبب انتقالا للمياه السطحية بسرعة ١,٧٠ م/ثا على عمق ٧٠٠م وتنتشر على عرض ٨٠ كم.

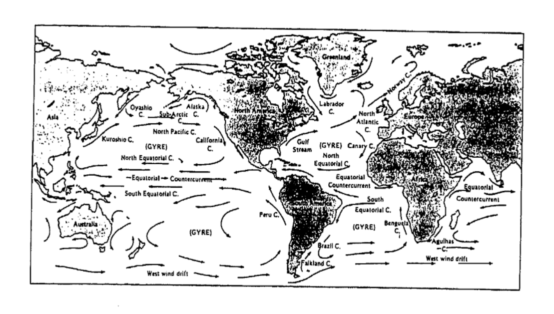
كذلك تتشكل تيارات متباينة الكثافة ناجمة من اختلاف درجة الحرارة، حيث تتناقص الكثافة بازدياد درجة الحرارة. ففي المناطق القطبية تهبط المياه السطحية الباردة إلى القاع وتنتشر باتجاه خط الاستواء.




**شكل ٦ـ٧ تيارات الملوحة بين البحر الأبيض المتوسط والبحر الأسود.**
يتجه تيار عميق ذو كثافة عالية (الأسهم الثخينة) من البحر المتوسط إلى البحر الأسود، وبالمقابل يتجه تيار سطحي خفيف (الأسهم الرقيقة) من البحر الأسود إلى البحر المتوسط.

بما أن كثافة المياه تختلف باختلاف درجة الملوحة وتزداد بازديادها، لذلك يتكون في مياه البحر نوع من التطبق للمياه بحسب درجة الملوحة التي تتزايد مع العمق. ولهذا تقوم بين الأحواض المغلقة ذات الملوحة المرتفعة، نتيجة للتبخر، والبحار تيارات متبادلة. وعلى هذا الأساس يجتاز مضيق الدردنيل تيار سطحي ذو مياه خفيفة يتجه من البحر الأسود إلى بحر ايجه، ويمر بالمقابل تيار عميق ذو مياه ثقيلة في الاتجاه المعاكس (شكل ٧-٦).

إن التيارات الشاطئية هي أكثر التيارات البحرية أثراً في تشكيل الشواطئ، ولكن بشكل عام يمكن أن نقول إن التيارات البحرية يقتصر عملها على نقل المواد الناعمة وتوضعها في أماكن أخرى قد تبعد بضعة كيلومترات. فتيار الخليج الدافئ الذي يصل عمقه إلى بضع مئات من الأمتار وعرضه إلى ٢٧٥ كيلومترا على طول الشاطئ السكانديناڤي، ينقل الرسوبات القارية الناعمة من المناطق الضحلة ومن الجزء الأعلى للمنحدر القاري إلى مسافة تنوف على آلاف الكيلومترات (شكل ٧-٧).




شكل ٧-٧: التيارات السطحية لمحيطات العالم.

وقد تؤدي بعض التيارات العميقة إلى حفر أخاديد تحت مائية وإلى اقتلاع الرسوبات ونقلها إلى أماكن أبعد. لهذا فإن التيارات البحرية تسهم في نقل الرمال والغضاريات القارية ونشرها على قاع المحيطات.

## الفعل الجيولوجي لمياه البحار والمحيطات

يكون الفعل الجيولوجي لمياه البحار والمحيطات واضحاً في المناطق الشاطئية حيث تتلاقى عندها المياه بكتل القارات. ويظهر عندها نشاط الأمواج والتيارات البحرية وحركات المد والجزر كعوامل للحت والترسيب، كما يظهر فيها نشاط الأنهار في الترسيب فقط.

### العمل الحتي للأمواج

تستهلك الطاقة الحركية للأمواج بمعظمها في نطاق التكسر بالاضطراب والاحتكاك بالقاع وتحريك الرسوبات ونقل المواد الناعمة منها إلى عرض البحر. لذلك نجد أن معظم الفعل الجيولوجي للأمواج يتم في هذا النطاق. ويعتمد العمق الذي تبدأ فيه الأمواج بالتكسر وتحريك الرسوبات وحت الصخور الشاطئية على ارتفاع الموج وطبيعة القاع. وتبدأ معظم الأمواج البحرية بالتكسر على عمق يقرب من ارتفاعها أو من ١,٥ ضعف ارتفاعها. فإذا كان ارتفاع الموج لا يزيد في معظم الأحوال على ستة أمتار، فإن العمق الحتي الفعال للأمواج لا يزيد على تسعة أمتار تحت سطح البحر. وقد أثبتت هذه الحدود النظريّة بالملاحظات التي توصلت إلى أنه من النادر أن يؤثر تكسر الأمواج في قيعان تزيد أعماقها على سبعة أمتار. فإذن يكون نطاق تكسر الأمواج هو المكان التي تعمل فيه الأمواج البحرية ذات الطاقة الحركية الاضطرابية العالية على حت اليابسة.

والجدير بالذكر أن ضرب الأمواج لليابسة يكون عنيفاً وفعالاً أثناء العواصف الشديدة. فالشاطيء الغربي لسكوتلندا معرض بشكل مباشر لأمواج المحيط

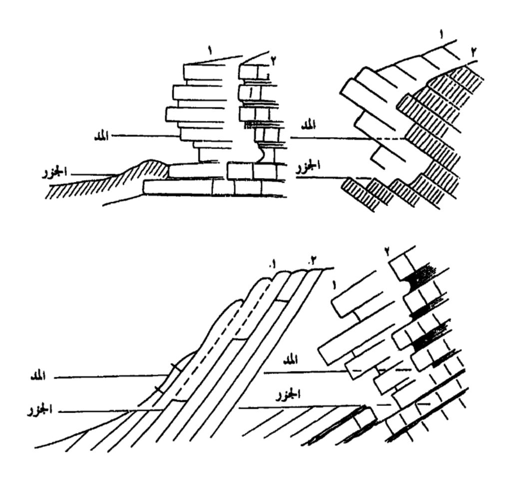
الأطلسي. وأثناء عاصفة كبرى أدى ضرب الأمواج إلى فصل كتلة كبيرة، من رصيف كاسر للموج، تزن نحو (١٢٠٠) طن وتحريكها نحو عرض البحر. وفي عاصفة أخرى حدثت بعد خمس سنوات ضربت الأمواج هذه الكتلة وحطمتها. ويقدر الضغط المؤدي لمثل هذا العمل الحتي بنحو ٢٧ طناً / م٢. ويمكن للأمواج البحرية أن تحطم الكتل الصخرية وتبعدها عن مصدرها بقوتها الضاغطة على الصخور، فعندما تصطدم مياه الأمواج بالصخور الشاطئية تؤدي إلى ضغط الهواء الذي يملأ الشقوق والفواصل الصخرية. وعندما يرتد الموج إلى عرض البحر يعود الهواء المضغوط إلى التمدد بصورة فجائية بقوة كبيرة تكاد تبلغ درجة الانفجار فتؤدي إلى تكسير الصخر وتفتيته.

أما المسافة الشاقولية التي يصل إليها فعل الأمواج فوق مستوى سطح البحر، فيمكن أن تُذهل من ليس له خبرة جيدة عن الشواطئ. فخلال عاصفة شتاء حدثت عام ١٩٥٢ على شاطئ اسكوتلندا أيضاً شطرت الأمواج قارباً بخارياً صغيراً وألقت نصفه على جرف صخري يرتفع (٤٥) متراً عن سطح البحر.

ويوجد نوع آخر من الحت يحدث ضمن نطاق تكسر الأمواج، وهو البري والسحج بوساطة المواد الرسوبية المحمولة في مياه الأمواج، التي تضرب في صخور الشاطئ، مما يؤدي إلى إهترائها وتوسيع شقوقها وتنعيم السطوح الصخرية وتدويرها ولكن يختلف تأثير الأمواج في الصخور الشاطئية بحسب العوامل التالية:

١ـ طبيعة الصخور: فالصخور اللينة تتهدم بصورة أسرع من الصخور القاسية.

٢ـ ميل الطبقات الصخرية التي تتكون منها المنطقة الشاطئية، فإذا كان هذا الميل نحو البحر ساعد ذلك على تفكك الصخور بعد تآكل بسيط. أما الميل نحو اليابسة فإن صخوره تقاوم التعرية البحرية بدرجة أعظم (شكل ٧ـ٨).




**الشكل ٧ـ٨: تطور الشواطئ بحسب وضعية الطبقات.**
**١ـ مرحلة سابقة ٢ـ مرحلة لاحقة**

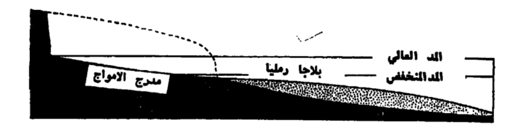
٣ـ الفواصل والشقوق التي تنتشر في الصخر، فكلما كانت كثيرة كان التهدم سهلاً. أما إذا كانت قليلة فإن مقاومة الصخر للحت البحري تكون كبيرة.

٤ـ اتجاه الأمواج: فإذا كان عمودياً على الشواطئ كان أثرها في تفكيك الصخور أعظم مما لو كان مائلاً. لأن المياه في الحالة الأخيرة لا تصطدم مباشرة بالشاطئ وإنما تسير موازية له دون أن تحدث أثراً ما.

ومما لا شك فيه أن أثر الأمواج في تشكيل النطاقات الشاطئية ذات الصخور المفتتة يختلف عنه في حالة الشواطئ الصخرية. ففي الحالة الأولى يقتصر عمل الأمواج على سحب المواد المفتتة نحو البحر. أما في الحالة الثانية فإن العمل الحتي

للأمـواج يظهـر بصـورة واضحـة. ولـذا تتمـيز هـذه الشـواطئ بتعـدد الظواهـر الجيورمورفولوجية أهمها الفجوات والكهوف والأقواس البحرية.

**١ـ الفجوات: Notches**: تحفـر الأمـواج البحريـة أسـفل الصخـور الشـاطئية في المنطقة التي تقع بين مستوى المـد والجزر، وتـؤدي إلى تشـكل فجـوة تظهـر فوقهـا صخور الشاطئ ناتئة نحو البحر، ثم لا تلبث أن تنهار بفعل الثقالة الأرضية، ويظهـر الشاطئ على شكل جرف قائم مرتفع يعلو بوضـوح فـوق مسـتوى سـطح البحـر، ويتغير تبعاً لذلك انحـدار الشـاطئ. ويسـتمر عمـل الأمـواج في الصخـور الشـاطئية وتتكون في أسفلها فجـوة جديـدة، وهكـذا تـتراجع الشـواطئ وتغمـر ميـاه البحـر الأجزاء التي كسبتها مـن المنطقـة الشـاطئية مشـكلة مـا يسـمى مدرجـات الأمـواج wave - cut terrace. أما المواد المفتتـة فتـتراكم في قـاعدة الجـدار مشـكلة شـيئاً فشيئاً بلاجا رمليا beach يحد مستواه المائل مـن قـوة الأمـواج وتتوقـف في النهايـة عملية الحت.

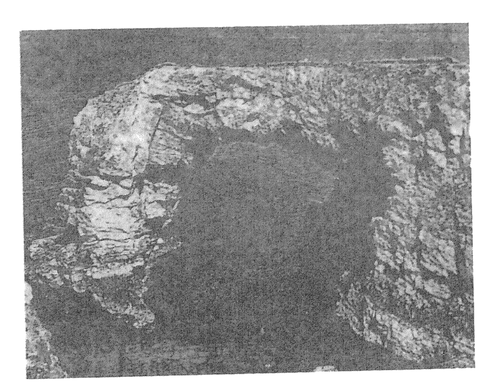



شكل ٧ـ٩: يوضح تراجع خط الشاطئ وتشكل مدرج الأمواج.

**٢ـ الكهوف Caves**: تتكون الكهوف في الشـواطئ الصخريـة الـتي تتمـيز بكـثرة الفواصل والشقوق الشاقولية، حيث يكون لقوة الأمواج وما تحمله من مـواد مفتتـة عمل حتى كبير على طول الشـقوق. ثـم لا تلبـث الفجـوات المتشـكلة تدريجيـاً أن تتوسع، نتيجة اندفاع الأمواج نحو الشاطئ وضغط الهواء الموجود بداخلها ثم تمـدده بصورة فجائية عندما تتقهقر مياه الأمواج، مما يؤدي إلى زيادة حجم الفجوات الـتي

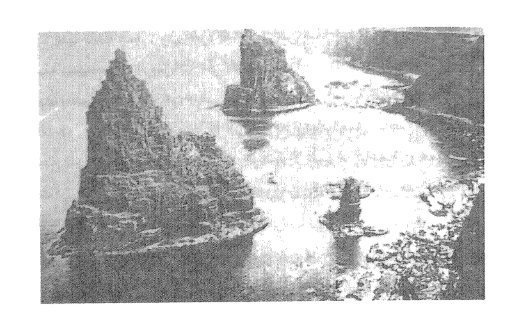
تبدو على شكل كهوف.

**٣- الأقواس البحرية Sea arches**: وهـي تتكـون في الشـواطئ الـتي تكـون فيهـا اليابسة ممتدة على شكل لسان صخري في عرض البحر، حيث تحفـر فيهـا الأمـواج كهوفاً بحرية جانبيـة نتيجـة اصطـدام ميـاه البحـر مـن كـلا الجـانبين. ثـم لا يلبـث الكهفان الجانبيان أن يتقابلا وتتكـون فتحـة كبـيرة في اللسـان الصخـري، وتعـرف أمثال هذه الفتحة بالأقواس البحرية.



**شكل ٧-١٠: الأقواس البحرية.**

عندما تنهار الأجزاء العليا من هذه الأقواس فإنها تبدو على شكل أعمدة قائمـة (المسلات البحرية Stacks or Sea Needles)، إلى جـانب الشـاطئ الصخـر وتكون قاعدتها أعرض من أطرافها العليا.



شكل ٧ـ١١: يوضح المسلات البحرية .

وقد تتكون المسلات البحرية أيضا في الحالة التي تصمد فيهـا بعـض التكوينـات الصخرية الصلبة أكثر من التكوينات اللينة.

**٤ـ الشواطئ المتعرجة:** تتعوج الشواطئ عندما تتعـاقب فيهـا تكوينـات صلبـة مـع تكوينات لينة، حيث يكون تأثير عمل الأمـواج في التكوينـات اللينـة أكـبر منهـا في التكوينات الصلبة، مما يؤدي إلى تشكيل شواطئ متعرجة كثيرة الرؤوس والخلجان.

## ب ـ نقل الرسوبات بواسطة الأمواج

يتحرك الفتات الصخري الناجم من اهتزاء اليابسة بالأمواج مع ما تجلبه الأنهار والمجاري المائية الأخرى إلى البحر تحركاً متقطعاً. فهي تُسحب أو تُدحرج على القاع أو تُحمل في فترات غير نظامية أو تُنقل بحالة معلقات غروية، وذلك حسب حجومها وحسب طاقة الأمواج والتيارات البحرية. ويمكن للرسوبات في نطاق التكسر الموجي، حسب ما يلاحظ في معظم الشواطئ، أن تتحرك باتجاه اليابسة أو بعيداً عنها باتجاه البحر. وفي الجزء الداخلي من هذا النطاق، حيث تكون المياه عميقة نسبياً، تنزاح الرسوبات على القاع بالأمواج أثناء العواصف بحركات مختلفة، تكون حصيلتها التحرك نحو عرض البحر. فكل حبة رسوبية تُقتلع من مكانها عدة مرات في كل حالة تزداد فيها طاقة الموج. ومع ازدياد العمق تتناقص الطاقة الحركية بشكل تدريجي لدرجة تصبح فيها غير محركة إلا للمواد الناعمة. ويحصل بنتيجة ذلك فرز للرسوبات حسب التدرج الحجمي من الخشن بالقرب من الشاطئ إلى الناعم بالابتعاد عن الشاطئ.

نجد في الرفوف القارية التي بنيت بالرسوبات أن رسوباتها تتدرج بشكل نطاقي من الرمل إلى الغضار. وهذا يشمل جميع المواد الرسوبية الناجمة من حت الأمواج والمنقولة من اليابسة إلى البحر. وقد أجريت حسابات على نسب المشاركة بين هذه الرسوبات على امتداد بعض الشواطئ أشارت إلى أن حجم الرسوبات المنقولة من اليابسة إلى البحر أعظم بكثير من الرسوبات الناجمة من حت الأمواج. وتختلف هذه النسب من مكان لآخر حسب عوامل عديدة ومتنوعة.

يلاحظ في الشواطئ الموجودة في مناطق خطوط العرض العالية والمتوسطة أنه لا يوجد دائماً التدرج الحجمي بالابتعاد عن اليابسة، وعوضاً عن ذلك يلاحظ وجود حواجز طولانية من الحصى الخشن موجودة وراء نطاق تكسر الأمواج، وفي عدد من الحالات يشير وجود مثل هذه الحواجز إلى مصدر جليدي من مورينات سابقة توضعت فوق رفوف قارية ناهضة، وكانت شواطئها أخفض مما هي عليه الآن. وقد أدى هبوط المورينات وارتفاع مستوى البحر إلى تخريب أعرافها الحادة

بالأمواج والتيارات وتركيز الحصى الخشن بعيداً عن الشاطئ.

## حـ ـ توضعات الشواطئ

عندما تلتقي الأمواج بالشاطئ، لا تكون قوة اندفاعها واحدة في جميع النقاط. فهناك مناطق محمية تكون سرعة الأمواج فيها ضعيفة وبالتالي يكون عملها ترسيبياً بحتاً. أما المناطق التي يكون فيها اصطدام الأمواج قوياً فتكون موادها المفتتة كثيرة وعند تقهقرها تأخذ معها كثيراً من هذه المواد ثم تدفعها ثانية نحو الشاطئ. وهكذا تتكرر هذه العملية وينجم منها محو النتوءات والزوايا في القطع الصخرية وصقل جوانبها حتى تصبح ملساء ذات أشكال مدورة أو بيضوية.

وعندما تشتد الرياح وتصبح زوابع وأعاصير، فإن قوة الأمواج تشتد وتقذف المواد المفتتة إلى الشاطئ وتوضعها في منطقة تعلو عن مستوى البحر، ويكون توضعها على أشكال طولية تنحدر نحو البحر. وتكون المواد المتراكمة في هذه الحالة خشنة ولا أثر للمواد الناعمة فيها، لان الأمواج تأخذها معها إلى عرض البحر. تدعى الشواطئ التي تتراكم فيها أمثال هذه الرسوبات بالشواطئ الحصوية. وتتكون عادة في الشواطئ الصخرية حيث تساعد على وجود كميات كبيرة من الحصى.

إذا دخلت الأمواج البحرية القوية منطقة محمية كالخلجان فإنها تفقد قوتها بالتدريج وتوضع حمولتها على شكل حبل شاطئي يفصل بين المنطقة الخليجية والبحر مشكلا بحيرة شاطئية Lagoon هذا إذا كانت الأمواج عمودية. أما إذا كانت الأمواج مائلة فإنها تؤدي إلى تشكل الشواطئ الرملية (البلاجات) نتيجة انتقال المواد المفتتة على طول الشاطئ وترتيبها حسب حجومها.

# الترسيب البحري

## آ ـ النطاقات البحرية المختلفة

لقد استعمل في تحليل الرسوبات البحرية ووصفها قرائن مختلفة. إلا أن الأعماق التي تشكلت فيها هي أكثر القرائن استعمالا وعلى هذا فقد ميز بدءا من الشاطئ

نحو عرض البحر النطاقات التالية:

١ـ المنطقة الساحلية.

٢ـ نطاق الأعماق.

٣ـ نطاق الأعماق السحيقة.

**١ـ المنطقة الساحلية أو منطقة الرف القاري Continental shelf**

يتراوح عمق هذه المنطقة من الصفر إلى ـ ٢٠٠م. ويكون الانحدار ضعيفاً من رتبة اثنان بالألف. وإن وجود توضعات قارية وأخاديد نهرية ومجار سيلية عديدة على طول المنحدر البحري يدل على أنها ناجمة من تهديم القارة. وتشمل هذه المنطقة على:

آ ـ **النطاق الشاطئي Littoral zone**: ويشمل الأجزاء الشاطئية الواقعة بين الحدين الأقصيين للمد والجزر وتكون رسوباتها وسطا بين البحرية واللابحرية.

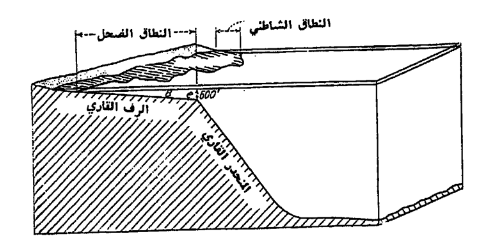
ب ـ **النطاق الضحل Neritic zone**: ويشمل الأجزاء البحرية الواقعة بين الحد الأدنى للجزر وحافة المنحدر البحري حيث يزداد انحدار قاع البحر بشدة وبشكل فجائي. وغالباً ما يشكل هذا الانكسار المفاجئ في العمق حداً طبيعياً حقيقياً لهذا النطاق.

**٢ـ المنحدر القاري أو نطاق الأعماق bathyal zone أو Continental slope**

وهو نطاق ذو انحدار شديد من رتبة ٤٠ ـ ٦٠ بالالف ويمتد من عمق –٢٠٠ م إلى عمق –٢٠٠٠ م.

**٣ـ نطاق الأعماق السحيقة Abyssal zone**

وهو نطاق يتجاوز عمقه –٢٠٠٠م، وتوجد فيه حفر قد يصل عمقها إلى –٥٠٠٠ م أو –٧٠٠٠ م أو حتى –١١٨٠٠ م.




شكل ٧ـ١٢: يوضح المناطق البحرية المختلفة.

## ب ـ عمليات الترسيب في النطاقات البحرية المختلفة

**١ـ رسوبات المنطقة الساحلية:** إن العمليات الترسيبية التي تجري في المناطق البحرية الضحلة عمليات فيزيائية وكيميائية وعضوية يأخذ كل منها أهمية واتساعاً حسب المناطق المختلفة.

تؤثر الأمواج وتيارات المد والجزر والتيارات البحرية في استقرار الرسو بات في الأجزاء القليلة العمق وتؤدي إلى اهتزاء الحبيبات وتكسر قواقع الكائنات الحية أو الميتة.

حين تدخل مياه الأنهار النطاق الضحل تترك قسماً كبيراً من حمولتها بسبب الانخفاض المفاجئ لسرعتها، وقد تشكل أحياناً السدادة الموحلة بسبب الفعل الكترولييتي لمياه البحر المؤدي إلى تشكل ندف، ناجمة من تخثر المعلقات الغروية. وقد يكون توضع هذه المواد موقتاً أو دائماً حسبما تكون المنطقة فوق مستوى تأثير الأمواج أو تحته.

كذلك تنشط في المناطق الساحلية العمليات الكيميائية حين تتوافر المواد المنحلة المختلفة المنقولة إلى البحر، والتي يجري ترسيبها إما بفقدان غاز الكربون أو بسبب

التركيب الضوئي للنباتات البحرية المؤدية إلى ترسيب الكربونات، أو بسبب تشكل كبريت الهدروجين بفعل الباكتريات المرجعة المؤدي إلى ترسيب الكباريت، أو بسبب الترسيب المباشر الناجم من نشاط عمليات الترسيب.

عادة تكون الأماكن الضحلة غنية بالكائنات الحية وذلك عندما يكون القاع متماسكاً يسمح بنمو الحيوانات اللاطئة مثل الرخويات وشوكيات الجلد والبراكيوبودا والمرجانيات. وأحياناً أخرى تخلو المناطق الضحلة من الكائنات الحية بسبب جرف الرسوبات من القاع بالتيارات المائية، أو بسبب تغيرات مفاجئة في درجات الملوحة والحرارة التي تؤدي إلى موت الكائنات الحية وسقوطها إلى القاع.

**توزع الرسوبات في المنطقة الساحلية**

تميل الأماكن القريبة من الشاطئ إلى احتواء الرسوبات الخشنة، وغالباً ما تكون هذه الرسوبات سميكة في المناطق القريبة من مصبات الأنهار. أما البقايا العضوية فيتم حفظها حين يتهيأ لها طمر سريع بالمواد الرسوبية.

وبصورة عامة تتوزع الرسوبات الحطامية المنقولة إلى البحر بشكل تزداد فيه خشونة الحبيبات مع الاقتراب من خط الشاطئ. فإذا تصورنا مقطعاً عرضياً يمر في رسوبات المنطقة الساحلية وجدنا أننا نبتدئ برسوبات بحصية قريبة من الشاطئ لا تلبث أن تنتقل باتجاه الداخل إلى رملية ثم إلى سلتية غضارية وأخيراً رسوبات غضارية. وقد نجد في بعض الأماكن طبقات كلسية أو تناوب طبقات غضارية كلسية وغضارية رملية مع طبقات كلسية، وذلك حسب ملائمة شروط بيئاته للحياة العضوية.

**٢- رسوبات نطاق الأعماق:** تشمل رسوبات الأعماق الغضاريات والأوحال العضوية، ورسوبات تيارات العكر.

تغطي قاع نطاق الأعماق مواد غضارية آتية من اليابسة، ويميل لونها إلى الرمادي والرمادي المزرق. وتوجد في الأماكن المجاورة للنطاق الضحل أوحال كلسية ناعمة.

اما الأوحال العضوية التي يحويها نطاق الأعماق فهي ناجمة من عضويات أكثرها مجهري، تلاءمت مع الحياة في نطاق المياه السطحية، وأكثر هذه الكائنات الحية تبني قواقعها من مادة كربونات الكلسيوم أو السيليكا المنحلة في مياه المحيطات. وعند موت هذه العضويات تسقط قواقعها إلى الأعماق وتستقر على القاع مكونة ما يسمى أوحالاً عضوية[1]. وإن وحل الغلوبيجيرينا Globigerina ooze ووحل الشعاعيات Radiolarian ooze من أشهر الأوحال العضوية المعروفة وأكثرها انتشاراً.

يظهر في نطاق الأعماق والأعماق السحيقة ما يسمى رسوبات العكر Turbidites. تنشأ تيارات العكر Turbidity currents عند مصبات الأنهار، حيث تتراكم على سطوح منحدرة قريبة من الشاطئ كميات كبيرة من الرسوبات، وبازدياد التراكم على سطح منحدر، أو بنتيجة لحركة هزة أرضية يمكن أن تنزلق مشكلة تيارات عكر ذات سرعة كبيرة، يمكنها أن تنقل الرمال والحصى إلى نطاق الأعماق، أو توصلها إلى الأعماق السحيقة.

**٣- رسوبات نطاق الأعماق السحيقة:** تغطي الرسوبات الغضارية مساحات شاسعة من قاع المحيطات. وتكون ناعمة للغاية، ونجد فيها عقد منغنيزية.

أما مصدر الغضاريات فغير معروف تماماً، ويحتمل أن تكون ناجمة من الغبار الذي تذروه الرياح فوق سطح المياه، أو يمكن أن تصدر من الرماد البركاني، أو ذات منشأ قاري نقل بواسطة الأنهار من اليابسة إلى المحيطات. يميل لون الغضاريات إلى الرمادي المزرق أو الأحمر. ويرجع اللون الأحمر إلى تهيئ أوساط مؤكسدة، لأن المياه القطبية تحمل معها حين تهبط باتجاه قاع البحر شيئاً من الأوكسجين وثنائي أوكسيد الكربون، وبما أن هبوط الجزئيات الرسوبية يتم بشكل بطيء، فإن هذه الجزئيات لها فرصة كافية لأكسدتها قبل أن تستقر على القاع.

أما العقد المنغنيزية فتتألف من نواة دقيقة صلبة مكونة من ذرة رمل أو شظية صخرية أو مستحاثية، محاطة بطبقات من أوكسيد المنغنيز بسماكات مختلفة. أما

---

(1) توصف عادة الرسوبات بأنها أوحالاً عضوية حين تحوي ما يقرب من ٣٠٪ قواقع عضوية.

مصدر اوكسيد المنغنيز فمن الممكن أن يكون ذا منشأ قاري منقولاً من اليابسة، أو مشتقاً من تفاعل المواد البركانية تحت البحرية مع المياه البحرية وهو الأكثر احتمالاً. أما الأوحال العضوية التي يحويها نطاق الأعماق السحيقة، فهي أوحال الشعاعيات، وتخلو من الأوحال العضوية الكلسية، لأن القواقع المجهرية المتساقطة تذوب في المياه القطبية المحملة بثنائي أوكسيد الكربون قبل وصولها إلى القاع.

### معدل الترسيب

تتراكم الغضاريات والأوحال العضوية في الأعماق والأعماق السحيقة بنفس المعدل تقريباً، ولكن يتغير حسب الموقع والبيئة، حيث تتراوح معدلات الترسيب في المحيط الهادي والمحيط الهندي ما بين المليمتر والسنتيمتر في كل ألف سنة، بينما تتراوح في المحيط الأطلسي من (١-١٠) سنتيمتر. ويرتفع هذا المعدل بنسبة كبيرة في الرفوف القارية وأعلى المنحدرات القارية، إذ يقدر بـ (٢٠ ـ ٣٠) سنتيمتر كل ألف سنة.

### الهبوط التدريجي لقاع الحوض الرسوبي

يؤدي استمرار تراكم الرسوبات فوق قاع الحوض الرسوبي إلى تزايد سماكتها وبالتالي إلى هبوط القاع تدريجياً تحت تأثير ثقل الرسوبات الهائل. ومن الادلة الواضحة على هبوط قاع الحوض الرسوبي، وجود الأرصفة المرجانية ورسوبات ذات سحنة نيريتية على أعماق كبيرة. مع أن الأخيرة توضعت في الأصل على قيعان لا يزيد عمقها على ٢٠٠م. والأرصفة المرجانية تنمو على قيعان لا يتعدى عمقها بضع عشرات من الأمتار. وهذا دليل واضح على هبوط قاع الحوض الرسوبي بشكل تدريجي بصورة متناسبة مع تزايد سماكة الرسوبات المتوضعة في هذا الحوض.

### السحنات Facies

تعرف السحنة من الناحية الجيولوجية بأنها المظهر العام الليتولوجي والبيولوجي لرسوبات ما. وبالامكان أن نميز بالنسبة للمنشأ: سحنة حطامية، وسحنة كيميائية،

وبيو كيميائية. أما بالنسبة للعمق فنميز سحنة شاطئية ونيريتية وعميقة وسحيقة.

وتمتاز السحنة الشاطئية بالأرصفة الهامشية والتوضعات الخشنة والحبال الشاطئية والتشكيلات البيوضية.

أما السحنة النيريتية فتمتاز باحتوائها على اشنيات كلسية ومرجانيات وطحلبيات، وتشكل العناصر الخشنة جزءاً هاماً منها.

أما سحنة الأعماق فتتميز بأن موادها تكون غضارية أو غضارية كلسية، وقد تكون على شكل أوحال عضوية. بينما تكون رسوبات سحنة الأعماق السحيقة غضارية سيليسية حمراء اللون.

## صفات الرسوبات البحرية

تتصف الرسوبات البحرية بعدد من الصفات يمكن اختصارها بما يلي:

### ١- التطبق

تتوضع الرسوبات على شكل طبقات منضدة بعضها فوق بعض. وينجم هذا التطبق من تغيرات في الترسيب، وهذه التغيرات لها أسباب عديدة. ينجم التطبق من توقف الترسيب وعودته من جديد إذا حدث تغيير قبل استئناف الترسيب. فلو صببنا رملا في كأس ماء وتوقفنا ثم تابعنا صب الرمل فإن التطبق لا يظهر ما لم تهز الكأس كي ينضغط الرمل قليلا قبل أن نستأنف صبه من جديد. فأي تغيير ولو كان بسيطاً في شروط الترسيب أو في المواد الرسوبية يؤدي إلى ظهور التطبق. فقد ينجم من تغير في طبيعة الرسوبات، أو في حجوم الحبيبات المترسبة. ويكون التطبق واضحاً في التوضعات الموسمية وذلك بتعاقب نطاقات قاتمة اللون ونطاقات فاتحة اللون حسب التغيرات المناخية.

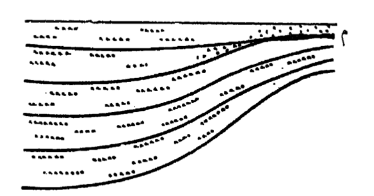
**البنية العدسية والممرات الجانبية:** يتفاوت انتظام سماكة الطبقات وامتدادها في حدود واسعة، ففي أنواع صخور الغضار الصفحي يكون التطبق منتظماً ومستوياً.

أما في غيرها فإن الطبقات ترق أو تزداد سماكتها أو تنقطـع علـى شـكل عدسـات. وقد تحدث البنية العدسية غالباً في المناطق الشاطئية التي تتميـز بوجـود بحيرات شبه مغلقة. حيث يلاحظ وجـود طبقـات ذات امتـداد أفقـي محـدود ينتهـي طرفاهـا في شكل إسفيني ويمر بوضوح إلى طبقات ذات طبيعة مختلفة.

**التوافق وعدم التوافق:** تستمر عمليات الترسيب منـذ أن بـدأ الحـت علـى سـطح الأرض، ومن المحتمل أن نجد في بعض مناطق قاع المحيط سجلاً ترسيبياً متصلاً يمثـل جميع الأزمنة الجيولوجيـة حتـى الوقـت الحـاضر. وفي هـذه الحالـة تكـون الطبقـات متوازية بصورة منتظمة وتشكل ما يسمى المجموعات المتوافقة.

أما فوق اليابسة، عندما تـدرس سلاسـل الصخـور الرسـوبية، فإنـه يظهـر فيهـا ثغرات صغيرة أو كبيرة تمثل توقف عمليات الترسيب لفـترة مـن الزمـن، سـواء تبـع ذلك ترسيب مواز للطبقات السابقة أم ترسيب على سطح حتي للطبقات السـابقة، أو مسطح حتى لطبقات سابقة أصيبت بالطي، ففي هذه الحالة الأخيرة يحصل عـدم توافق زاوي.

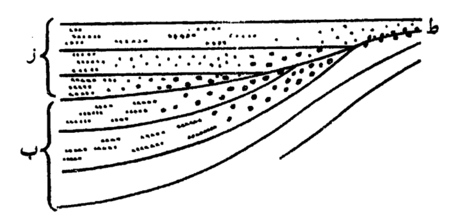
تظهر الحالات الأولى من عدم التوافق في العتبات حيـث أن الترسـيب في حفـرة الترسيب أكبر مما هو في العتبة. وقد لا تتوضع في العتبة بعض الطبقات تبعاً لظروف معينة فيوجد مكانها سطح مهمل (شكل ٧-١٣).




**شكل ٧-١٣: حفرة ترسيب وعتبة.**

تتكدس الرسوبات في حفرة الترسيب (إلى اليسار) فـي سـماكات أكبر منهـا فـي العتبـة (إلـى اليميـن) وقـد لا تتوضع في هذه العتبة بعض الطبقات، فيوجد مكانها سطح مهمل (م).

كذلك يحصل عدم التوافق في حالة التجاوزات والانسحابات البحرية (شكل٧ـ١٤).




شكل ٧ـ١٤: رسم تخطيطي يبين زمرة منسحبة (ب)، وزمرة متجاوزة (ز)، يفصل بينهما عدم توافق ستراتيغرافي. ويمثل (ط) سطح طفو.

## ٢ـ المستحاثات Fossils

تتصف الرسوبات البحرية باحتوائها على مستحاثات، تكون محفوظة جيداً في الرسوبات العميقة، على عكس مما في الرسوبات الشاطئية. ويعتمد على المستحاثات في تعيين العمر النسبي للصخور وبالتالي التعاقب الزمني لها، وذلك بالمقارنة مع تسلسل طبقي حدد تعاقبه الزمني اعتماداً على المستحاثات. وهنالك فوائد لوجود المستحاثات، بغض النظر عن تحديدها لعمر الصخور، إذ يمكن الاستدلال منها على وضعية الطبقات المتعاقبة، مثل وضعية النمو للمرجانيات، والحشو الجزئي للقواقع وجحور الديدان.

## ٣ـ الأرصفة المرجانية Coral reefs

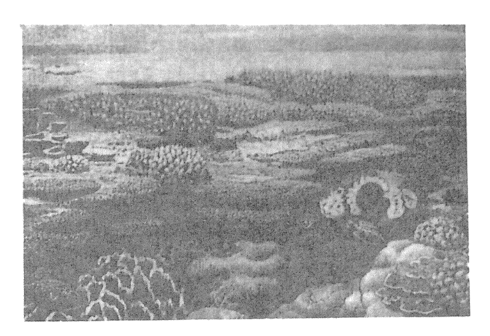
يتطور على امتداد الشواطئ في المنطقة المدارية مستعمرات مرجانية، تتكون من كتلة من العضويات الكلسية مثبتة بصخور قاع البحر. تنمو المرجانيات على عمق

يتراوح بين - ٢٠م إلى - ٤٥م في مياه مضطربة تحتوي على الاوكسجين ودرجة حرارة لا تقل عن ٢٠° مئوية وملوحة نظامية ٣٥ غ/الليتر، ولهذا توجد في بحار المناطق المدارية، ولا تنمو في مصبات الأنهار حيث تقل نسبة الملوحة وتتراكم الرسوبات.

يسهم عدد من العضويات في بناء المستعمرات المرجانية كالاشنيات الكلسية والطحلبيات والرخويات ووحيدات الخلية المجهرية (الفورامينيفيرا)، حيث تملأ هياكلها الكلسية ثقوب وفجوات الرصيف المرجاني وتحوله إلى كتلة صلبة متماسكة. وهكذا فإن المرجانيات تشكل الهيكل الرئيسي الذي يملأ بالعضويات والترسبات الكلسية.

يمكن أن نميز استناداً إلى أشكال المستعمرات المرجانية ومكانها الأنواع التالية:

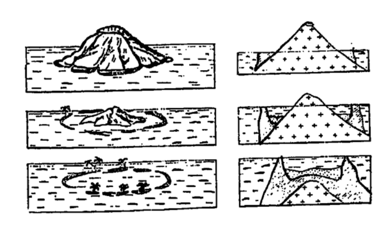
آ - **الأرصفة الهامشية Fringing reefs**: تتشكل على طول الشواطئ وتكون موازية لها.



**شكل ٧ـ١٥: رصيف مرجاني هامشي.**

ب ـ الأرصفة الحاجزة Barrier reefs: تتشكل على مسافة ما من الشاطئ وتفصلها عنه منطقة لاغونية موازية للشاطئ. وأشهر الحواجز المرجانية واضخمها موجود على الشاطئ الشمالي الشرقي لاستراليا، حيث تمتد لمسافة تزيد عن ٢٠٠٠كم وتبعد عنه ٥٠ ـ ١٠٠كم.

حـ ـ الجزر المرجانية Atolls: وهي عبارة عن حواجز مرجانية تتكون وتنمو حول الجزر في المياه المدارية (وخصوصا في المحيط الهادي)، وقد تعرض بعض هذه الجزر للغمر بمياه المحيط فظلت حواجز المرجان حولها على شكل حلقة تملؤها مياه المحيط من الداخل وتعرف مثل هذه الجزر بالحلقات المرجانية.



شكل ٧ـ١٦: تشكل الجزر المرجانية

ان الأنواع الأخيرة من المستعمرات المرجانية تبلغ سماكات كبيرة قد تصل إلى عمق ٣٩٠٠م. كيف نستطيع أن نشرح هذه السماكات الكبيرة مع أن الحيوانات المكونة للمستعمرات لا تعيش إلا عمق في حدود (-٤٥م).

لقد تعرضت نظريات عديدة لتفسير سماكة الأرصفة المرجانية منها نظرية داروين Charles Darwin، حيث تقول إن السبب الرئيس هو هبوط الركيزة الصخرية التي ترتكز عليها المرجانيات هبوطاً تدريجياً. ويرجع بعض العلماء

السماكات الكبيرة للأرصفة المرجانية إلى التغيرات التوازنيـة لمستوى سطح البحـر خلال الحقب الرباعي. فقد انخفض هذا المستوى خلال مرحلة جليدية واحدة من (٩٠ ـ ١٠٠)م، أو حتى (١٥٠) م بالنسبة لبعض الجيولوجين. فالتضاريس الطافية تتسطح بالحت وتصبح الجزر ممهدة. وقد سمح المناخ الحار خلال الفترة بين الجليدية أو بعد الجليدية بتمركز المرجانيات، التي تأخذ بالنمو نحو الأعلى أثناء ارتفاع مستوى سطح البحر إثر ذوبان الجليديات.

# الفصل الثامن

# البحيرات والمستنقعات وأهميتها الجيولوجية

## مقدمة

تتكون البحيرات من تجمع المياه في منخفضات قارية مغلقة، لا تتصل مباشرة بالبحار. وإن دراسة تشكل البحيرات وشروطها الفيزيائية ـ الكيميائية، والكائنات الحية التي تعيش فيها، تكوّن فرعاً خاصاً من الهيدرولوجيا يعرف بعلم البحيرات Limnology.

تغطي البحيرات مساحة نحو ٢,٧٠٠,٠٠٠كم² أي نحو ١,٨٪ من سطح القشرة الأرضية، ٧٥٪ منها بحيرات عذبة. وتختلف في أحجامها واتساعها: من بحيرات صغيرة مساحتها أقل من كيلومتر مربع (بحيرة جنيف في سويسرا ٠,٦كم²) إلى بحيرات كبيرة تغطي آلاف الكيلومترات المربعة. وكذلك تختلف في أعماقها، من عشرات السنتمترات (كما في بحيرة ايلتون ٠,٨م) إلى ١٦٢٠م في بحيرة بايكال في سيبيريا. وتتراوح في ارتفاعها عن سطح البحر من مستويات أعلى منه إلى مستويات أدنى منه كما في البحيرات السكاندينافية والبحر الميت.

إن دراسة التوزع الجغرافي للبحيرات واوضاعها العميقة وطبيعة احواضها، ودرجة ملوحتها تمكننا من فهم العمليات التي تجري داخل القشرة الأرضية وعلى سطحها. وهكذا فإن تحول البحيرة التي يخترقها نهر من الأنهار إلى بحيرة راكدة

مغلقة، أو البحيرات ذات المياه العذبة إلى بحيرات مالحة، يشير إلى تغير في المناخ من رطب إلى جاف، في حين ان ظهور بحيرات كبيرة وعميقة يكون دليلاً على حدوث حركات تكتونية قوية في القشرة الأرضية، وحدوث انهدامات فالقية أدت إلى تشكل هذا النمط من البحيرات. وكذلك تساعد دراسة الرسوبات البحيرية الحديثة على فهم أصل الرسوبات المماثلة العائدة لأحقاب قديمة.

## أصل أحواض البحيرات

إن أصل الأحواض البحيرية شديد الاختلاف والتنوع، وقد وصف كل من العالمين السوفيتيين آ. بيرفوخين Pervukhin وبوغوسلوفسكي Bogoslovsky أحواض البحيرات استناداً إلى ظواهر منشئية genetic features إلى الأنواع التالية:

### ١- البحيرات التكتونية

تتشكل هذه البحيرات نتيجة للحركات التكتونية التي تصيب القشرة الأرضية، والتي تؤدي في كثير من الأحيان إلى انخفاضات بسبب انهدامات فالقية، حيث تنخفض الأرض المحصورة بين فالقين متوازيين مشكلة حوضاً يمتلئ بالماء بنتيجة حركة المياه السطحية، وتكوّن نوعاً من البحيرات الاخدودية.

وأهم ما تمتاز به تلك البحيرة انها عظيمة الطول وقليلة العرض، وإن عمقها كبير وجوانبها شاقولية ومرتفعة، ومن أمثلة هذا النمط بحيرتا طبريا والبحر الميت، المحصورتان بين فالقين كبيرين على امتداد خط الانهدام الكبير من جبال طوروس في الشمال حتى البحر الأحمر في الجنوب، وبحيرة تانجانيكا في افريقيا وبحيرة بايكال في سيبيريا.

وقد ينتج من الحركات التكتونية تشوهات تأخذ شكل مقعرات كبحر الخزر، أو تقبب تكتوني يرتفع من قلب الأودية فتشكل حواجز تقف عندها المياه، كبعض بحيرات السهل السويسري الذي أدى تطور التقببات فيه إلى حجز المياه المنحدرة إليه من جبال الألب.

**٢- البحيرات البركانية**

تتشكل أحواض هذا النمط من البحيرات من تجمع المياه، في فوهات أو كلديرات بركانية قديمة (بحيرة Servieres في جبال الكتلة المركزية) أو في فوهات بركانية كبعض بحيرات في (جزر كامشتاكا واسلندا)، وقد تؤدي البراكين إلى تشكيل حواجز في كثير من الأودية، عندما تكوّن مخاريطها في هذه الأودية، أو عندما تلقي صباتها فيها (مثل بعض بحيرات هضاب أرمينيا).

**٣- البحيرات الجليدية**

يكوّن هذا النوع ٩٠٪ من بحيرات العالم. فهي عظيمة الانتشار على الرغم من أن المناطق التي تتأثر بالجليديات في الوقت الحاضر، والتي تأثرت به في الماضي المناطق محدودة. وتتشكل أحواض هذه البحيرات بنتيجة النشاط الحتي أو الترسيي للجليديات، وهي منتشرة بخاصة في الأقاليم القارية التي كانت مغطاة بالجليديات، والذي يعود تاريخها إلى بدء ظهور الإنسان (Anthropogen). وأهم هذه البحيرات:

آ - **بحيرات الحلبات الجليدية:** كثيراً ما تحتل قيعان الحلبات الجليدية بعض البحيرات الصغيرة بنتيجة تجمع المياه الناجمة من ذوبان الجليد.

ب - **البحيرات المعلقة:** تتكون البحيرات المعلقة من تجمع المياه في الأودية الجليدية المعلقة.

جـ - **بحيرات السدود الجليدية:** قد تعترض المورينات الجبهية الوادي الذي تنحدر فيه الجليدية، كسد يحول دون تسرب المياه الناجمة من الذوبان، فتتجمع المياه أمام المورينات مكونة بعض البحيرات.

وهناك نوع من البحيرات تتكون في مناطق المورينات الجبهية للجليديات. ففي الحالة التي تتشكل فيها جليديات السفوح، تبدو المورينات الجبهية على شكل هلال عظيم المساحة، فالمياه الناجمة من الذوبان تتجمع خلف المورينات الجبهية مشكلة

بحيرة جليدية في المناطق السهلية.

وكذلك تتشكل بحيرات عندما تتقدم الغطاءات الجليدية وتعترض بعض المجاري المائية مشكلة سدا تتجمع المياه إلى جانب الحائط الجليدي، وتكوّن ما يعرف ببحيرات السدود، وهي كثيرة في جزيرة غرينلاند.

د ـ هناك نوع من البحيرات تكوّنها الغطاءات الجليدية وهو من أهم الأنواع جميعاً. تتشكل هذه البحيرات نتيجة الحفر المستمر الذي تسببه الألسنة الجليدية المنحدرة من الغطاءات الجليدية وتكون أحواض واسعة لا تلبث أن تمتلئ بالماء بعد ذوبان الجليديات وتكون بحيرات واسعة عظيمة المساحة. وأمثلة هذا النوع كثيرة ومنها البحيرات الخمس الكبرى في أمريكا الشمالية التي تعد أعظم بحيرات العالم اتساعاً.

## ٤ـ البحيرات النهرية:

هي بحيرات تتشكل نتيجة الفعل الجيولوجي للأنهار، وهي بحيرات متعددة الأنواع مختلفة المظاهر أهمها ما يلي:

آ ـ تنتشر بعض البحيرات في السهول اللحقية التي تكثر فيها الالتواءات في المجاري النهرية. وتتشكل بخاصة أيام الفيضانات النهرية حيث تؤدي سرعة المياه الكبيرة إلى قطع الالتواءات مشكلة البحيرات الهلالية، كبحيرات وادي الميسيسبي.

ب ـ في حالة الفيضانات النهرية الكبيرة المفاجئة، يمكن أن تتجمع الرسوبات الضخمة التي جرفتها مياه الفيضان في الأماكن الضيقة من النهر، مشكلة حاجزاً تقف خلفه المياه.

جـ ـ قد تتشكل الأحواض البحيرية من أحد فروع الدلتا التي قطعت اتصالها بالبحر.

## ٥ ـ البحيرات الشاطئية

تتشكل هذه البحيرات خلف ألسنة الرسوبات المتوضعة على طول الشاطئ أو خلف الكثبان الرملية الشاطئية.

### ٦- بحيرات الأراضي الكلسية:

غالباً ما يكون قاع الدولين في الأراضي الكلسية مملوءاً بالماء، وقد يكون هذا التجمع موسمياً أو دائماً.

ونذكر أيضاً وجود بحيرات جوفية في أغلب الكهوف والمغاور الكارستية كبحيرة جعيتا في مغارة جعيتا بلبنان.

أما أحواض البحيرات الحرارية الكارستية Thermokarst lacustrine basins فتكون موجودة فقط في المناطق دائمة التجمد. حيث يؤدي ذوبان الجليد في بعض مناطقها إلى تشكل أحواض تملؤها المياه الناجمة من ذوبان الجليد. وهي تشبه في أشكالها البحيرات المتشكلة على سطح الصخور الكلسية.

### ٧- بحيرات انزلاق الأراضي:

قد تتجمع الكتل المنزلقة على طول منحدرات المناطق الجبلية في الأودية المجاورة وتشكل سدا يعترض سير المياه وتتجمع على شكل بحيرة، كبحيرة البيرنة في جبال الجورا.

تعرف البحيرات التي تتشكل نتيجة انغلاق الوديان بانزلاق الأراضي في المناطق الجبلية، أو في حالة الفيضانات النهرية الكبيرة، أو بتدفق اللافا، أو في حالة السد الجليدي ببحيرات السدود Dammed lakes. وإلى هذا النمط تنتسب خزانات المياه التي يتم إيجادها عن طريق إنشاء السدود الاصطناعية، كما هو الحال في بحيرة الأسد.

تلك كانت فكرة موجزة عن أصل الأحواض البحيرية، وهنا يجب أن نلاحظ أن قوى مختلفة تعمل في الطبيعة متواقتة وتؤدي إلى تغيرات مختلفة على سطح الأرض، بما في ذلك تشكل أحواض البحيرات. فهنالك بعض البحيرات التي ترجع في أصلها إلى اجتماع عدد من العمليات الداخلية والخارجية. وعلى سبيل المثال نذكر بحيرتي لادوغا واونيجا فقد تشكلتا بنتيجة عوامل تكتونية (يشير إليها تصدعات في الركيزة الصخرية) غير أن للجليديات القارية القديمة، التي غطت هذه

البقعة مرة بعد أخرى دوراً مهماً في تشكلهما.

## أصل مياه البحيرات:

يرجع أصل مياه البحيرات إلى المصادر الرئيسة التالية:

١ـ المياه الجارية السطحية (مياه الأنهار والأمطار) التي تملأ المنخفضات التضاريسية.

٢ـ المياه الباطنية، حين يتقاطع منسوب الماء الجوفي مع منخفض قاري مغلق يمتلئ بالماء.

٣ـ مياه المحيطات، ويكون هذا واضحاً في البحيرات التي ليس لها أنهار مصرفة، ومقتطعة من البحر كما هو الحال في بحر قزوين[١]، فقد كان في القديم متصلاً ببحر آزوف عبر قناة مانيش Manych.

## النظام الهيدرولوجي للبحيرات:

يرتبط النظام الهيدرولوجي للبحيرات ارتباطاً وثيقاً بالشروط المناخية، ويمكن أن نصنف البحيرات استناداً إلى شروطها الهيدرولوجية إلى:

**آ ـ بحيرات عديمة التصريف:** وتكون هذه البحيرات منتشرة في المناطق الجافة ونصف الجافة، وتتغذى بمياه الأنهار والسيول السطحية والأمطار وليس لها نهر مصرف، وإنما تخسر مياهها بوساطة التبخر فقط.

**ب ـ بحيرات المياه الجارية:** وتوجد هذه البحيرات غالباً في أماكن ذات مناخ رطب، تصل إليها المياه بوساطة الأنهار والسواقي الرافدة، وتخرج منها بوساطة الأنهار والسواقي المصرفة.

**جـ ـ بحيرات ذات تصريف متناوب:** يستمر فيها التصريف فقط في وقت ارتفاع منسوب الماء. وبعض البحيرات يتم تصريف مياهها فقط عن طريق تسربها عبر صخور الركيزة الصخرية.

---

[١] مثال البحيرة المغلقة ولكبرها يطلق عليها بحر.

أما سوية الماء في البحيرات فتتغير بصورة مستمرة. وتكون هذه التغيرات طفيفة وموسمية في المناطق المعتدلة.

ولطبيعة الأراضي تأثير كبير في تغيير سوية ماء البحيرات. فالبحيرات الواقعة في مناطق ذات صخور نفوذة، يكون تغير سوية الماء فيها كبيراً، بينما يكون العكس في البحيرات الواقعة في مناطق ذات صخور كتيمة.

## التركيب الملحي لمياه البحيرات Salt composition of lake water

يعتمد التركيب الكيميائي لمياه البحيرات على توازن المياه والمظاهر المناخية. فالبحيرات التي تقع في مناخ رطب، وذات مياه متجددة باستمرار، تتميز بمياه سطحية وتحت سطحية عذبة، أما البحيرات التي تقع في مناطق جافة وحارة، فإنها تزداد ملوحة لشدة تبخر مياهها.

تعتمد درجة الملوحة وتركيب الأملاح في مياه البحيرات أيضاً على نوع الأملاح المحمولة إليها بمياه الأنهار الرافدة، والبنية الجيولوجية، وطبيعة غطاء الأنقاض الصخرية وعلى الغطاء النباتي وعلى عوامل أخرى كثيرة.

ويمكن أن نصنف البحيرات ذات المياه المالحة حسب تركيب المواد المنحلة في مياهها إلى النماذج التالية:

١- البحيرات القلوية أو الكربوناتية Soda or carbonate lakes

٢- البحيرات المرة أو بحيرات الكبريتات Bitter or sulphate lakes

٣- البحيرات المالحة أو الكلوريدية Saline or chloride lakes

تكون المياه في بعض البحيرات ذات تطبق مائي، فالمياه المشبعة بالأملاح تكون مستقرة في الأعماق. أما المياه السطحية، فتكون نسبة الأملاح فيها ضعيفة جداً وقد يستفاد منها في الشرب.

## النظام الحراري للبحيرات:

تكون المياه في البحيرات ذات تطبق حراري، حيث تكون كثافة الماء أكبر ما يمكن في الدرجة +٤°. تكون درجة حرارة قاع البحيرة +٤°، أما المياه السطحية

فتختلف درجة حرارتها باختلاف الفصول، فترتفع في الصيف وتنخفض في الشتاء، ولكن هذا الاختلاف لا يتعدى عمقاً قليلاً من مياه البحيرة.

وحين تصبح حرارة المياه السطحية +٤° فإن التطبق الحروري ينعدم، وتختلط المياه السطحية بالعميقة ويصبح الوسط المائي مضراً بالحياة. ويلاحظ اختفاء الأسماك في هذه الفترة.

أما مياه البحيرات في المناطق البركانية وفي البحيرات العميقة، فتكون درجة حرارتها ونسبة أملاحها مرتفعة بالأعماق، بالاضافة إلى ارتفاع نسبة $CO_2$ و$SH_2$ ولهذا تكون الحياة مستحيلة في هذا النمط من البحيرات.

**حركة مياه البحيرات:**

تظهر حركة كتل الماء في البحيرات على شكل أمواج أو تيارات أو مزج اضطرابي للمياه، وأيضاً تظهر من خلال انخفاض منسوب الماء وارتفاعه. وجميع هذه الحركات تحصل بتأثير الرياح. وأبعد من ذلك فإن مزج الماء بوساطة تيارات الحمل، بسبب تباين الكثافة، يجعل الحركة تأخذ مجراها في البحيرات.

يمكن أن يلاحظ في بعض البحيرات الكبيرة، وفي جو هادئ، حركات سطح الماء الناجمة من تغيرات الضغط الجوي، فمستوى المياه يرتفع ببطء كبير في أحد جوانب الشاطئ بضعة سنتمترات، مع انخفاض موافق في الجانب الآخر من الشاطئ. وتدعى مثل هذه الحركات بحركات سيشز **Seiches**.

ولكن تبقى الحركات الناجمة عن تأثير الرياح أهمها وتقوم بدور فعّال في عمليات الحت والنقل.

## الفعل الجيولوجي للبحيرات

### أ ـ الحت البحيري

يماثل الحت الناتج عن عمل الأمواج في البحيرات كثيراً الحت البحري ويختلف عنه بالشدة فحسب. حيث تقوم الأمواج ببري الأماكن الناتئة من جهة، وايجاد

فجوات وحفرا في الصخور الشاطئية من جهة ثانية، مؤدية إلى انهيار الطبقات العلوية وتراجع خط الشاطئ بمعدل بضعة أمتار في السنة. ويكون العمل الحتي للأمواج كبيراً عندما تكون الرياح على شكل أعاصير قوية. وطبقاً لبعض المعطيات التي سجلت أثناء العواصف التي اجتاحت الاتحاد السوفييتي عام ١٩٥١، تبين تراجع خط الشاطئ في بعض أماكن احدى البحيرات بمقدار ٥ ــ ٨م في أسبوع واحد. وإن العامل الرئيس الذي يساعد الأمواج على الحت هو المواد المفتتة وطبيعة الصخور الشاطئية فيما اذا كانت غير متماسكة أو لينة.

## ب ـ الترسيب البحيري

ان الأهمية الأولى لنشاط البحيرات هو تراكم رسوبات فيها تكون مصدراً لعدد كبير من الفلزات الاقتصادية. وتتحدد طبيعة الرسوبات البحيرية بعوامل مختلفة منها: الشروط المناخية، والمظاهر التضاريسية والتصريف والبنية الجيولوجية للمنطقة المحيطة وحجم وشكل حوض البحيرة، ونسبة التدفق للبحيرة. فالرسوبات في المناطق الجافة تختلف عن مثيلتها في البحيرات الموجودة في مناطق رطبة. وكذلك تختلف الرسوبات في بحيرات ذات مياه جارية عذبة عن الرسوبات التي توجد في بحيرات ذات مياه راكدة. ويمكن أن نميّز حسب الظواهر المنشئية وتركيب الرسوبات ثلاثة نماذج من الرسوبات البحيرية:

١ـ رسوبات أرضية المنشأ Terrigenous أو حطامية Detrital وهي تأتي بالدرجة الأولى من المواد اللحقية التي تنقلها الأنهار الرافدة للبحيرات، وبنسبة أقل من المواد الناتجة عن الحت البحيري.

٢ـ رسوبات كيميائية المنشأ Chemogenous وهي تنشأ من ترسيب كيميائي للأملاح أو الغرويات المنحلة في الماء.

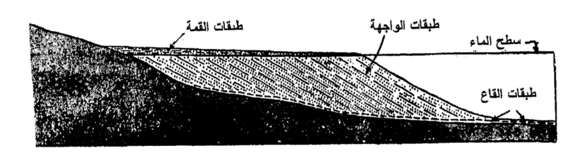
٣ـ رسوبات عضوية المنشأ Organogenous: وتنجم من تكدس البقايا الصلبة للكائنات الحية التي تعيش في طبقات المياه السطحية، وفوق قاع البحيرات.

## الترسيب الحطامي

آ ـ **الرسوبات الشاطئية:** تكون الرسوبات في الشواطئ ذات فرز جيد بسبب غسلها المستمر بواسطة الأمواج: حيث تتدرج من مواد بحصية إلى مواد رملية إلى مواد غضارية. أما في الشواطئ المحمية فتكون رسوباتها ناعمة جداً.

ب ـ **رسوبيات الدلتا:** تتجمع الرسوبات التي تحملها الروافد النهرية عند مصباتها في البحيرات وتشكل دلتات ذات بنية نموذجية، حيث تتألف من طبقات رملية وغضارية. ويمكن أن نميز فيها ثلاث مناطق رسوبية: ففي أعلى الدلتا هنالك طبقات قمة topset beds تكون قريبة من الوضع الأفقي، تليها طبقات شديدة الانحدار تسمى طبقات الواجهة foreset beds ثم طبقات القاع bottomset beds وتكون بوضعية موازية لارضية البحيرة. أما طبقات القمة فهي امتداد لرواسب النهر العادية، كما أن طبقات القاع امتداد لرواسب قاع البحيرة. وتبقى طبقات الواجهة هي الظاهرة المميزة للدلتا (شكل ٨ ـ ١).

تتألف رسوبات طبقات الواجهة من مواد خشنة يغلب فيها الرمل الغضاري، وقد تحفظ فيها المواد العضوية وغالباً لا يتم حفظها بشكل جيد.




**شكل: (٨ ـ ١) يمثل رسوبات الدلتا عندما يكون منسوب الماء ثابتاً.**

إذا كان منسوب ماء البحيرة غير ثابت كثير التغير فإن رواسب الشاطئ تتوضع وفق فرز معين للفترة التي يثبت فيها منسوب الماء، وهذا لا يلبث أن يتهدم حين

تغير منسوب الماء، وعموماً تظهر الرسوبات الشاطئية بدون نظام، إنما تميز عن غيرها بموادها البحصية.

أما الدلتات فتصبح غير جيدة الوضوح بالنسبة لما هو عليه في البحيرات ثابتة المنسوب. وقد تتمثل طبقات الواجهة بعدسات من الرمل متداخلة مع رسوبات القاع، أو تأخذ شكل سلم متدرج حين يكون التغيير باتجاه واحد صعوداً أو هبوطاً. وحين يكون التغير مضطرباً، فإن الرسوبات الدلتاوية تكون وضعياتها مشوشة متداخلة بتعقيد كبير. وبشكل عام تصبح منطقة الدلتا مؤلفة من رواسب متداخلة من طبقات ناعمة وخشنة تغلب عليها المواد الخشنة باتجاه النهر والمواد الناعمة باتجاه البحيرة.

أما رسوبات القاع فهي مؤلفة من مواد ناعمة من الغضار والرمل الناعم غسلت من الأجزاء الشاطئية. وهذه المواد يمكن أن يخالطها نسب من مواد منحلة مثل كربونات الكلسيوم وأحياناً بعض المواد العضوية.

تُظهر توضعات القاع الناعمة شيئاً من الفرز الجيد والتطبق الناعم، وكلاهما يعتمد على النظام السنوي للبحيرة. فالبحيرات ثابتة المنسوب أو ذات التغيرات المنتظمة تعطي رسوبات قاع ذات تطبق متجانس إلى حد ما. أما البحيرات التي تقع في المناطق الباردة، حيث يتجمد ماؤها السطحي أيام الشتاء، فإن رسوبات القاع فيها تتطبق وفق تغيرات السنة، ويتناوب فيها عادة رسوبات غضارية تميز فترات الهدوء، ورسوبات سلتية رملية تمثل فترات النشاط، وكل ازدواج في التطبق مؤلف من طبقات غضارية تليها طبقات رملية يمثل دورة سنوية كاملة. ويدعى هذا التطبق بالتطبق الموسمي أو الحولي الذي يستخدم في تحديد الأعمار المطلقة لرسوبات الرباعي في المناطق الجليدية.

أما في المناطق الاستوائية وتحت الاستوائية فيرتبط تشكل العصائب الموسمية بالأشهر الممطرة والجافة خلال السنة. وفي بعض الحالات يرجع التطبق إلى موت المتعضيات الحيوانية وحيدة الخلية والأشنيات والطحالب الدقيقة في الخريف، مما يعطي اللون الأسود لرسوبات هذا الموسم.

وينعدم التطبق في البحيرات كثيرة الأمواج بسبب اضطـراب الميـاه الـذي يمـزج الرسوبات، وأيضاً في البحيرات المحتوية على آكلات الأوحال mud - eaters.

## الترسيب الكيميائي

يضاف إلى الترسيب الحطامي في بحيرات المياه العذبة كميات هائلة من المعلقات الغروية، المؤلفة من البوكسيت واوكسيد الحديد المائي، وأحياناً هيدروكسيد المنغنيز، حيث توجد في قاع البحيرة على شكل تخثرات كروية ذات بنية متمركزة، مشكلة مصدراً مهماً لخامات الحديد. ويعتقد أن البكتريات الحديدية تلعب دوراً في تشكل هذه الخامات. وتوجد هذه الرسوبات بنسبة عالية في بحيرات المناطق الاستوائية لتوافر غطاء سميك من اللاتيريت الناجم من تجوية الصخور السيليكاتية.

أما في البحيرات قليلة الملوحة في المناطق نصف الجافة فيأخذ ترسيب كربونات الكلسيوم أهمية كبيرة.

تتميز مياه البحيرات في المناطق الجافة ونصف الجافة بدرجة عالية، من الملوحة حيث لا يوجد لها أنهار مصرفة، وتنقل الأمطار إليها الأملاح من التربة الملحية المجاورة لها. ويؤدي التبخر الشديد إلى إشباع زائد للمياه وتشكيل مياه شديدة الملوحة، يتبعها ترسيب كيميائي للأملاح مثل كربونات الصوديوم وكبريتات الصوديوم وكلور الصوديوم.

## الترسيب العضوي

تتميز بحيرات المياه العذبة في المناطق الرطبة بسماكات كبيرة من الرسوبات العضوية، تشتق من الكائنات العضوية الحيوانية والنباتية التي تعيش فيها، كالأشنيات والطحالب بالإضافة إلى العضويات الحيوانية المعلقة، حيث تسقط بقاياها بعد موتها إلى قاع البحيرة مختلطة مع الغضاريات مشكلة أوحالاً عضوية (السابروبيل Sapropel) وأكثرها يكون محتوياً على أبواغ نباتية وغبار طلع.

تبدأ البقايا العضوية المستقرة في قاع البحيرة بالتحلل بمعزل عن الهواء. وتلعب البكتريات اللاهوائية دوراً مهماً في تفكك المادة العضوية، حيث تأخذ الاكسجين

الداخل في تركيب المادة العضوية لتنفسـها، وتحولها إلى فحوم هيدروجينيـة، والـتي تتبع بتحويل المـادة العضويـة جزئيـاً إلى مـواد متفحمـة. تتشـكل السـابروبيلات في البحيرات الصغيرة والضحلة، أما في البحيرات الكبيرة والعميقة، فتختلط بالرسوبات الطينية، وتبدو بشكل هلامي رمادي مخضر أو بشكل كتـل بنيـة، ونتيجـة لازديـاد الضغط الناجم من تراكم الرسوبات فإنه ينضغط ويصبـح قاسياً ويتحـول إلى نـوع من الفحم يعرف باسم السابروبيليت **Sapropelite**.

### زوال البحيرات:

تزول البحيرات للسببين الرئيسين التاليين:

١- لملئها باللحقيات التي تجلبها الأنهار الرافدة، كما حدث لبحـيرة العتيبـة الـتي تمتلئ بلحقيات نهر بردى.

٢- انخفاض سويّة الماء في البحيرة: تنخفض سويّة المـاء في البحـيرة عندمـا يحفـر النهر المصرف مجراه في نقطة خروجه من البحيرة مسبباً بالتدريج قطع عتبتهـا. فـإذا استمر انخفاض سويّة الماء، فإن الرسوبات تمتد تدريجياً نحـو مركـز البحـيرة، وتـزول عندما تنضب مياهها.

## المستنقعات وأهميتها الجيولوجية

وهي منخفضات من سطح الأرض، تمتاز برطوبة عالية في النطـاق العلـوي مـن التربة والصخور، وبنمو النباتات الغزير وتشكل التـورب **peat**. وإن أحـد المظـاهر الرئيسة للمستنقعات هو تراكم التورب بسماكات كبيرة، مما يؤدي إلى نمـو جـذور النباتـات فيـه، ولا تصـل إلى الصخـور السـفلية. وهنـاك مسـتنقعات صغـيرة **bogs**

تكون سماكة التورب فيها قليلة وتصل جذور النباتات إلى القاعدة الصخرية. ولكن هذا التقسيم اسمي ويعد مرحلة من مراحل تطور المستنقعات.

تقدر المساحة المغطاة بالمستنقعات بنحو ١٧٥ مليون هكتار مربع منها ٧٢,٦٪ في المناطق الشمالية الغربية من روسيا، حيث توجد طبقات كتيمة قريبة جداً من سطح الأرض تساعد على تشكل المستنقعات.

## أنواع وتطور المستنقعات

تتطور المستنقعات في داخل القارات وفي المناطق الشاطئية المنخفضة. ويمكن أن تُصنف المستنقعات اعتماداً على نسبة المواد المغذية في مياهها، وغطائها النباتي وشكل سطحها إلى:

١- مستنقعات الأراضي المنخفضة **Lowland bogs**

٢- مستنقعات الأراضي المرتفعة **Upland moors**

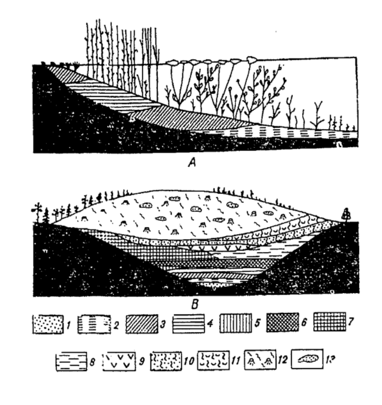
٣- مستنقعات انتقالية **Transition moors**

**١- مستنقعات الأراضي المنخفضة:** تتشكل هذه المستنقعات في انخفاضات تضاريسية، لها سطح منبسط أو مقعر، وتستمد مياهها من مياه الأنهار بالإضافة إلى مياه الأمطار التي تكون غنية بالفلزات والعناصر المعدنية، وهو شرط رئيس لنمو النباتات ذاتية التغذية كالسعديات **Sedges** وأذناب الخيل **Horsetails** والطحالب الخضراء وأشجار النشم **Alder** والبتولا **Birch**. ويكون التورب المتشكل من النباتات ذاتية التغذية له قيمة حرارية منخفضة ويعطي كميات كبيرة من الرماد.

تتشكل أيضاً مستنقعات الأراضي المنخفضة في أحواض بحيرية تصبح تحت شروط معينة موضعاً لترسيب كثيف من الوحل والطين مشكلاً مع العوالق الحيوانية والنباتية أوحالاً عضوية. ويصبح الوسط ملائماً لنمو النباتات المحبة للرطوبة وتدريجياً تغطى البحيرة بالنباتات وتتحول إلى مستنقع (شكل ٨ - ٢).

أما في البحيرات ذات المناطق الشاطئية شديدة الانحدار، فإن تشكل المستنقعات فيها يتم وفق عمليات مختلفة، حيث تنمو في الأماكن المحمية من تأثير الرياح

والأمواج بعض النباتات الطافية مثل March & Cinquefail Calla ذات الجذور الطويلة مع الطحالب وغيرها من النباتات. وبهذا يتشكل غطاء نباتي عائم تزداد سماكته بتزايد كثافة النباتات ويأخذ بالانغماس تدريجياً، وتبدأ الأجزاء الميتة من الطبقات السفلية منه بالتحلل والسقوط إلى قاع البحيرة مشكلة طبقات رسوبية. ومع مرور الزمن يصبح سطح البحيرة مغطى بغطاء نباتي سميك متماسك وقاع البحيرة مغطى بسماكات كبيرة من الأوحال العضوية. وتبدأ النباتات جميعها بالتفسخ بمعزل عن الاكسجين متحولة إلى التورب.




**شكل ٨ ـ ٢: A: رسم تخطيطي يمثل تشكل مستنقعات الأراضي المنخفضة**
**B: بنية المستنقع.**
**١ـ مارن مياه عذبة، ٢ـ سابروبيليت، ٣ـ تورب سابروبيلي، ٤ـ ١١ أنواع مختلفة من التورب، ١٢ـ طحلبيات مع جذل الصنوبريات، ١٣ـ تجمعات مائية موحلة على الغطاء الطحلبي.**

تتكون مستنقعات الأراضي المنخفضة بخاصة في المناطق المدارية وتحت المداريـة،

إذ تغزو المناطق المنخفضة لشواطئ الأطلسي في شمـال أمريكـا وفي جـزر اندونيسـيا وغيرها من المناطق.

### ٢- مستنقعات الأراضي المرتفعة:

تتشكل هذه المستنقعات في مجمعات مائيـة لها سـطح مقعـر. وهـي تنجـم مـن تقاطع منسوب الماء الجوفي مع منخفض تضريسي، وتكون المياه في هذه الحالة فقيرة بالمواد الغذائية، لذلك تنمو فيها النباتات فقيرة التغذيـة oligotrophic والطحـالب sphagnum. ويكون التورب المتشكل من هذه النباتات ذا قيمـة حروريـة مرتفعـة ويعطي كميات قليلة من الرماد.

### ٣- مستنقعات انتقالية:

تنمو فيها النباتات متوسطة التغذية mesotrophic حيث تحتاج إلى كمية قليلـة نسبياً من المواد الغذائية.

ويمثل هـذا التصنيـف في حقيقتـه مراحـل مختلفـة مـن تطـور المسـتنقعات يمكـن اختصارها فيما يلي:

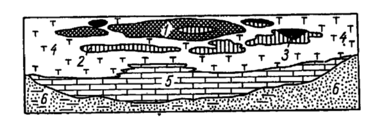
تأخذ النباتات في مستنقعات الأراضي المنخفضة موادها الغذائية في مرحلة معينة من الأوحال البحيرية. وعندما تنمو فيهـا طبقـات التـورب بسـماكات أكـبر، فـإن شروط التغذية تتغير ولا تستطيع النباتات الوصول إلى الأوحال البحيريـة، إذ تـأخذ موادها الغذائية من التورب، وكل جيل جديد من النباتات يستخرج مواده الغذائيـة من الجيل القديم. وبالنهاية يصـل الوسـط إلى مرحلـة تنخفـض فيـه نسـبة العنـاصر المغذية، مما يؤدي إلى ظهور نباتات متوسطة التغذية ومع نضوب المواد المغذية تظهر نباتات فقيرة التغذية، وبهذا تنتقل من نوع لآخر من المستنقعات.

## التوضعات المستنقعية

يشمل الترسيب المستنقعي رواسب كيميائية المنشأ إضافة إلى الرواسب عضويـة المنشأ. ويشار إلى النوع الأول منها بالكلس أو المارن المسـتنقعي، ويكـون أصلهمـا

مرتبطاً بمركبات تنقل إلى المستنقعات بوساطة المياه الجوفية، أو بوساطة المياه الجارية السطحية التي تكون غنية بمركبات كربونات الكلسيوم.

ويوجد أيضاً في المستنقعات رسوبات حديدية نقلت إليها بوساطة المياه تحت السطحية، وهي تتوضع على شكل كرات صغيرة من السيديريت غالباً، وتكون مختلطة مع الأوحال العضوية مشكلة خامات الحديد المستنقعية. وعندما يتعرض هذا السيديريت إلى الهواء الجوي يتأكسد معطياً الليمونيت. وينتشر في رسوبات البيئات المستنقعية المرجعة فلز الفيفيانيت Vivianite وهو فوسفات حديدية مائية $Fe_3(PO_4)_2.\ 8H_2O$ ويظهر أحياناً مرافقاً للسيدريت وغيره من فلزات أكاسيد الحديد. ويتوضع عادة على شكل بقع ترابية صغيرة بلون أزرق، ويوجد أحياناً على شكل عدسات كما هو واضح في الشكل (٨ـ٣). ويحتمل أن يكون مصدر المركبات الفوسفاتية هذه من البقايا العضوية.




**شكل ٨ـ٣: يوضح التوضعات المستنقعية في مناخ رطب**

**١ـ فيفيانيت، ٢ـ سيديريت، ٣ـ خام الحديد، ٤ـ تورب، ٥ـ كلس مستنقعي، ٦ـ رمل وغضار**

## التورب وتشكله:

يأخذ التورب أهمية كبيرة بالمقارنة مع أنواع رسوبات المستنقعات، وينشأ من تراكم بقايا النباتات المستنقعية التي تخضع في مراحل متأخرة إلى مجموعة معقدة من عمليات التفسخ.

حين تخضع النسج النباتية المؤلفة كيميائياً من الكربون والاوكسجين والهيدروجين والآزوت إلى التفسخ بملامسة الهواء، تتفكك إلى مركبات لاعضوية مثل ثنائي اوكسيد الكربون والماء وغيرها.

أما في البيئات المستنقعية، وبخاصة في أمكنة التراكم، فإن الوسط يفتقر للاوكسجين في الأماكن السفلية من الطبقات المتراكمة، حيث تخضع البقايا النباتية إلى التفسخ والتحول تحت تأثير العضويات الدقيقة، مثل الباكتريات والعفن مما يؤدي إلى تناقص تدريجي للاوكسجين من تراكيب هذه البقايا، وبالتالي تزايد تدريجي لنسبة الكربون المثبت التي ترتفع لتصل إلى ٥٧٪ وأحياناً إلى ٥٩٪. مع الإشارة إلى أن جزءاً من مواد هذه البقايا قد يقاوم التفسخ كلياً أو جزئياً وبخاصة المواد الخشبية. ويقود هذا التفسخ اللاهوائي للبقايا النباتية إلى تشكل مواد دبالية، وهي مواد رئيسة في التورب. وتدعى عمليات التحول إلى تورب بالتحول الدبالي humification وتعد مرحلة أولى وأساسية في تشكل الفحم الحجري. وهكذا نجد أن التورب يمثل بقايا نباتية نصف متفسخة، لونها بني أو مائل للأسود، ويصنف عادة حسب النباتات التي أدت تراكمات بقاياها إلى تشكله. هذا وتصل سماكات بعض تراكمات التورب إلى عشرة أمتار وأحياناً إلى أكثر من ١٥ متراً. ويستفاد من طبقات التورب كمادة للوقود والتدفئة، كما يستخلص منه صناعياً مواد متنوعة مثل الكحول والفينول والبارافين وغيرها، ويستفاد منه أيضاً كمادة عازلة للحرارة وكمادة مخصبة للتربة.

# القسم الثاني

## العوامل الجيولوجية الداخلية

## أو

## الجيوديناميك الداخلي

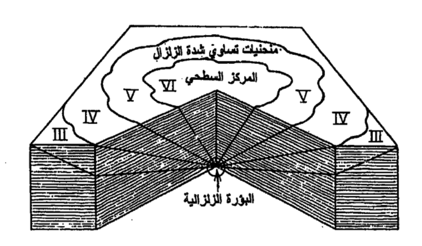
# الفصل التاسع

## الزلازل

بحثنا في القسم الأول من هذا الكتاب العوامل الخارجية التي تـؤدي إلى تغـيرات مسـتمرة في سـطح القشـرة الأرضيـة، مـن حـت ونقـل وترسـيب وظواهـر جيومورفولوجية متنوعـة. وتستمد هـذه العوامـل الخارجيـة طاقاتهـا مـن الاشـعاع الحراري للشمس وحركـة الريـاح والأمطـار والميـاه والتفـاعلات الكيميائيـة وفعـل العضويات. أما في هذا القسم فسـوف نبحـث في العمليـات الداخليـة الـتي تسـتمد طاقتها من باطن الأرض، من حرارة ونشاط مغمـاتي وعمليـات إعـادة تـوازن الـتي تؤدي إلى ظواهر معروفة كالزلازل والبراكين وحركات القشرة الأرضية.

الزلازل earthquakes هي حركات أرضية فجائية سريعة وخاطفة، قد تـؤدي إلى كوارث هائلة. وقد تكون خفيفة في رجّـات منـذرة مصحوبـة بضجيـج جـوفي بينما تكون أحياناً عنيفة ومدمرة.

حين حدوث زلزال أرضي في منطقة ما، فإنه يكون أقـوى مـا يمكـن في البـؤرة focus التي تكون في باطن الأرض وعلـى أعمـاق مختلفـة، حيـث تنتشـر الموجـات الاهتزازية منها في جميع الاتجاهات، وأما على سطح الأرض فتكون الهزة أعظمية في المركز السطحي epicentre. وهي المنطقة التي تعلو بؤرة الزلزال.




شكل ٩-١: مجسم يبين منحنيات تساوي الزلزال وعلاقاتها مـع المركـز السـطحي والموجـات الصـادرة عن البؤرة الزلزالية.

## مصدر الزلازل

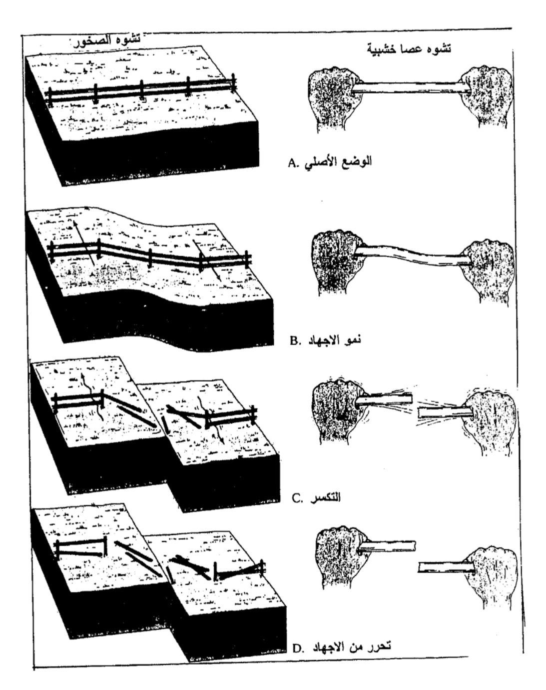
عندما يحدث زلزال في منطقة ما، يشعر الإنسان كأن الأرض قد ضربت بمطرقة هائلة أدت إلى هزها بشكل قوي في مساحة واسعة. ومـن أجـل تبسـيط ذلـك مـن

الناحية العملية يمكن إجراء تجربة بسيطة على لوح من الخشب أو على سطح سنضدة، نضرب على طرفها بمطرقة ونضع يدنا على الطرف المقابل حيث نشعر باهتزاز هذا الجسم الصلب، وكلما كان الجسم أكثر صلابة كان انتشار الاهتزاز فيه أقوى. إن سبب انتقال الموجات الاهتزازية في الأجسام الصلبة هو الطاقة المتحررة من ضرب المطرقة التي أدت إلى تشوه مرن في هذه الأجسام عند مرور الموجات الاهتزازية فيها. أما في حالة اهتزاز الأرض فلا توجد مطرقة تناسب ذلك، إنما يمكن لانفجار بركاني مفاجئ أو انهيار صخري ضخم أو حتى انفجار قنبلة أن تؤدي إلى تحرر طاقة تُحدث اهتزازاً في الأرض. كما أن انزلاق الكتل الصخرية الضخمة الموجودة على جانبي فالق بالنسبة إلى بعضها بعضاً يولد طاقة اهتزازية في الأرض.

إن الحركات المفاجئة التي تحدث في القشرة الأرضية بنتيجة انزلاق الكتل الصخرية على جوانب الفوالق هي المسؤولة عن حدوث معظم الزلازل. إلا أن حدوث الزلازل ليس بهذه البساطة من التعميم، فبعض الزلازل أقوى بملايين المرات من زلازل أخرى، وفي حالة كهذه يجب أن تكون الطاقة المتحررة ناجمة من ألوف الانزلاقات الفالقية، أو أنها تمثل تخزيناً للطاقة على مدى زمني طويل نسبياً لتتحرر فجأة في زلزال واحد. يضاف إلى ذلك أن السطوح الصخرية على جانبي الفالق لا تنزلق بالسهولة التي يمكن تصورها. فالطاقة المتولدة من الضغوط على الأجسام الصخرية تُختزن في أجسام الصخور بالتشوه المرن مثلها كمثل نابض فولاذي أُخضع للانضغاط بشكل تدريجي وتغيّر شكله ليعود إلى شكله الأصلي بعد زوال الضغط عنه.

وقد أتت فكرة تخزين الطاقة في الصخور بالتشوه المرن من الدراسات المطولة التي أجريت على فالق سان اندرياس San Andreas Fault في كاليفورنيا عام ١٨٧٤، كما حدد العالم ريد Reid وهو أحد الباحثين في زلزال سان فرانسيسكو عام ١٩٠٦ ولأول مرة كيفية حدوث الحركة على امتداد هذا الفالق. فقد اقترح هذا العالم نظرية الارتداد المرن elastic rebound theory المولدة للزلازل. وقد لاقت هذه النظرية قبولاً جيداً لتفسير حدوث الزلازل. وإن الشكل (٩-٢) يوضح

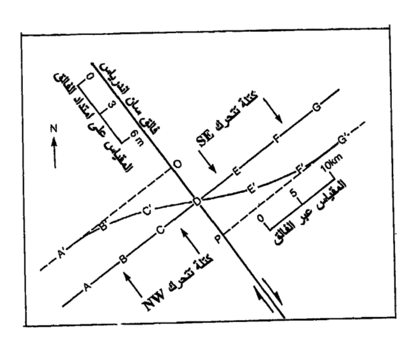
هذه النظرية.




**شكل ٩-٢: رسم يوضح نظرية الارتداد المرن.**

تنثني الصخور تحت تأثير الجهود المطبقة، كما تنثني عصا خشبية. وتختزن طاقة بالتشوه المرن وعندما يتم التغلب على القوى التي تشد الصخور إلى بعضها بعضاً تتكسر وتنزلق على بعضها بعضاً محررة للطاقة المختزنة، وعندها تعود الصخور إلى حالة الاستقرار ثانية.

تشمل هذه النظرية أن صخور القشرة الأرضية على جانبي فالق رئيس تكون تحت وطأة جهود مطبقة، قد تكون في اتجاهين متعاكسين. فالطاقة المتولدة من هذه الضغوط تُختزن تدريجياً بالتشوه المرن مثل شريط مطاطي مشدود، ومع مرور الزمن يحصل إجهاد في الصخور فتتمزق وتنزلق الكتل الصخرية على امتداد الفالق خلال ثوان أو دقائق على الأكثر. وتتحرر من جراء ذلك الطاقة المختزنة لتعود هذه الكتل إلى حالة الاستقرار بجانب بعضها بعضاً بوضعية غير مجهدة. ومع استمرار الضغوط تختزن الطاقة مرة ثانية وهكذا. وكل حركة مفاجئة ينجم منها زلزال أرضي كما يحدث على امتداد فالق سان اندرياس (شكل ٩-٣).

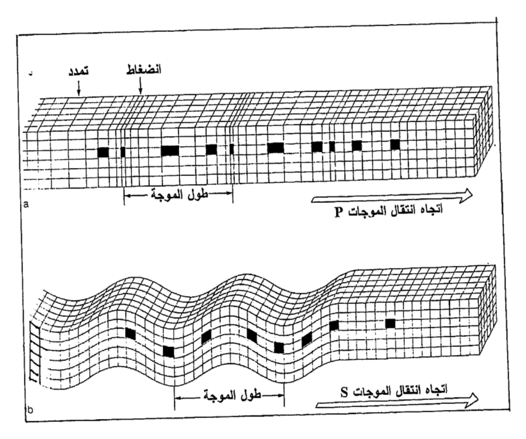



**شكل ٩-٣: زلزال نجم من تحرر فجائي للطاقة. هذا الرسم مبني على قياسات مساحية تفصيلية قرب فالق سان اندرياس بكاليفورنيا قبل وبعد الحركة المفاجئة التي أدت إلى زلزال عام ١٩٠٦.**

إن النقاط العلامة السبع من A إلى G كانت على خط واحد. وقد أدت الحركة البطيئة لكتلتي الفالق إلى إنحناء القشرة الأرضية وإزاحة النقاط إلى الوضعية الجديدة A´G´. وإن قوى الاحتكاك على جانبي الفالق تمنعها من الانزلاق المستمر. وبشكل فجائي تحطم هذا التماسك الاحتكاكي وارتدت الصخور على جانبي الفالق إلى وضعية الاستقرار. وأصبحت النقاط العلامة على امتداد الخطين A´O و PG´، أي بمقدار ازاحة OP.

## الموجات الزلزالية

تنتقل الطاقـة المتحـررة مـن إجهـاد الصخـور وتمزقهـا علـى سـطح الأرض وفي باطنها على شكل موجات تسري في الأجسام الصلبة في مختلف الاتجاهات بدءاً من موقع التمزق. وقد تمكن العلماء في مطلع القرن الحـالي مـن تحـري هـذه الموجـات. وقد وجدوا من خلال دراساتهم أن هناك مجموعتين رئيستين من الموجات الزلزاليـة التي تنشأ من انزلاق الكتل الصخرية، فالأولى منها تنتقل عبر طبقات سـطح الأرض وتعرف بالموجات السطحية surface waves، والثانيـة تنتقـل عـبر طبقـات تحـت سطح الأرض وتعرف بالموجات الجسمية body waves.

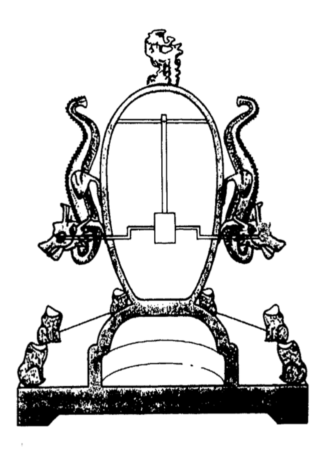



شكل ٩ـ٤: رسم توضيحي يبين الاختلاف بين الموجات الأولية والموجات الثانوية.
أ ـ الموجات الأولية ب ـ الموجات الثانوية.

تنقسم الموجات الجسمية إلى نوعين وهما الموجات الأولية والموجات الثانوية وذلك حسب طبيعة انتشارها عبر المواد. فالموجات الأولية primary waves هي موجات انضغاطية يكون فيها اهتزاز الجزيئات إلى الأمام والخلف في اتجاه انتقال الموجات مثل الموجات الصوتية وتؤدي إلى التغيّر في الحجم ويرمز لها بالحرف (P). وتنتقل في الأجسام الصلبة والسائلة والغازية. أما الموجات الثانوية secondary waves فهي أبطأ من الموجات الأولية، ويكون فيها اهتزاز الجزيئات باتجاه عمودي على اتجاه انتقال الموجات (شكل ٩ـ٤). ولا تنتقل إلا في الأجسام الصلبة وتؤدي إلى التشوه الدائم وتغيّر في الشكل. وسميت بأمواج القص shear waves ويرمز لها بالحرف (S). أما الموجات السطحية فهي أكثر تعقيداً من الموجات العميقة، فهي موجات تخرج من المركز السطحي للهزة وتنتشر عبر طبقات سطح الأرض بسرعة أقل من الموجات العميقة ويرمز لها بالحرف (L). وتكون حركة الموجات إلى الأعلى والأسفل، وتتحرك أيضاً من جانب لآخر. ولهذا فهي تؤدي إلى حركة سطح الأرض وجميع الأشياء الواقعة فوقه وتلحق أضراراً بالمباني والمنشآت.

## راسم الزلازل Seismograph

يجري تسجيل الموجات الزلزالية بجهاز خاص يرسم حركة الأرض أثناء حدوث الزلازل وهو جهاز السيسموغراف الذي صمم عام ١٨٩٧ من قبل العالم الانكليزي ميلن Milne. وهنا لا بد من ذكر الخبرة القديمة للصينيين في قياس الزلازل. حيث صمم أول جهاز لتحري الزلازل منذ أكثر من ١٨٠٠ سنة من قبل العالم والفيلسوف شانغ هينغ Chang Hing، وأطلق عليه في ذلك الوقت ديك الطقس الزلازلي earthquake weather cock (شكل ٩ـ٥).

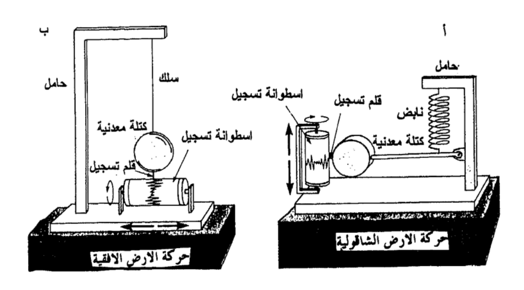


**شكل ٩ـ٥: الجهاز الصيني القديم لتحري حدوث الزلازل ومعرفة اتجاهها.**

**يتألف من جرة كبيرة مجوفة قطرها (٢م) مثبت على سطحها الخارجي وبمسافات متساوية ثمانية تنينات dragons تحمل في أفواهها كرات، ومتصلة بكتلة معدنية في داخل الجرة. فعند وصول الموجات الاهتزازية إلى الجهاز تتحرك الكتلة المعدنية وهي بدورها تُحرك فكي التنين الذي يقع في اتجاه الهزة، فتسقط الكرة من فمه إلى فم الضفدع المنتظر تحته.**

أما راسم الزلازل الحديث فيتألف من ثلاثة أجزاء رئيسة وهي ١ـ كتلة معدنية ثقيلة يصعب تحريكها ٢ـ إطار متين مثبت بالأرض ٣ـ وسيلة تسجيل (شكل ٩ـ٦). أما الكتلة المعدنية فتكون مثبتة ومشدودة بسلك إلى عمود قائم ثبت في قاعدة من الاسمنت وهي بدورها مثبتة في الأرض. تحمل الكتلة المعدنية، في الأجهزة القديمة، ذراعاً تنتهي بابرة تحتك بصورة خفيفة على لوحة تسجيل مثبتة على اسطوانة تدور ببطء حول محور. أما في الأجهزة الحديثة، فتتصل الكتلة المعدنية بذراع تحمل مرآة صغيرة تعكس

حزمة ضوئية دقيقة على ورقة تصوير ملفوفة على الاسطوانة المثبتة في القاعدة الاسمنتيـة. فعندما تكون القشرة الأرضية في حالة ثبات فإن الابرة أو الحزمـة الضوئيـة ترسـم خطـاً مستقيماً. فإذا اهتزت القشرة الأرضية اهتزت معها اسطوانة التسجيل ورسمت الأبـرة أو الحزمة الضوئية خطاً متعرجاً علـى ورقـة التصويـر. ويعـرف هـذا الخـط بالسيسـموغرام seismogram. وفي الوقت نفسه يقوم مسجل زمني بتسـجيل الوقـت الـذي تبـدأ فيـه الهزة، والوقت الذي تنتهي عنده.




**شكل ٩-٦: رسم يوضح كيفية عمل السيسموغراف**

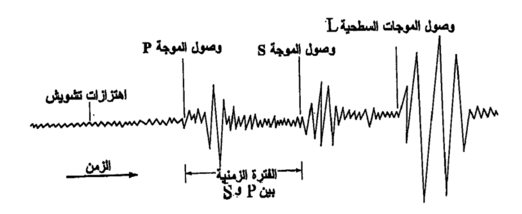
أ - سيسموغراف مصمم لتسجيل الحركة الشاقولية للأرض.

ب - سيسموغراف مصمم لتسجيل الحركة الأفقية للأرض.

ونظراً لأن الزلازل تُحدث حركات شاقولية وحركات أفقية، فإنه توجد حاجة إلى أكثر من نوع من السيسموغراف. فمحطات الرصد الزلزالي الجيدة يجب أن تتألف مـن ثلاث وحدات سيسموغرافية منها وحدتان أفقيتان موجهتان شمالاً ــ جنوبـاً، وشـرقاً ــ غرباً لتسجيل الحركات الأفقية كافة. والوحدة الثالثة لتسجيل الحركات الشاقولية.

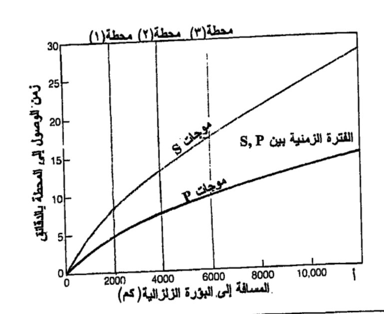
## تحديد مصدر الزلازل

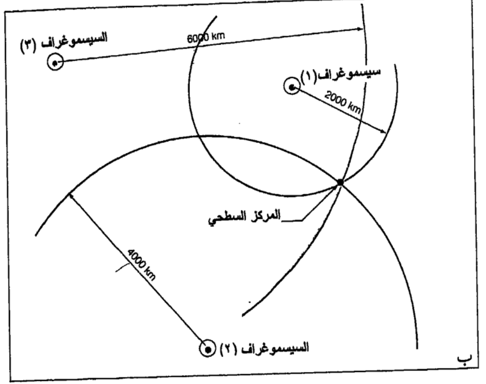
لقد ذكرنا أن سرعة الموجات الأولية أكبر من سرعة الموجات الثانوية، فمن الطبيعي أن تصل الموجات الأولية إلى محطات التسجيل قبل الموجات الثانوية (شكل٩-٧). وبصورة عامة تنتقل الموجات الأولية في المواد الصلبة بسرعة تعادل (١,٧) ضعفاً من سرعة الموجات الثانوية. وكلما كان مسار انتقال الموجات طويلاً زاد الفارق الزمني بين وصول الموجات الأولية والثانوية.




شكل ٩-٧: سجل زلزالي نموذجي يبين الفرق الزمني بين وصول الموجات P وS.

وقد استفاد العلماء من هذا الفارق الزمني في تحديد بعد المركز السطحي عن مركز الرصد الزلزالي. ولكن تحديد بعد المركز السطحي عن مركز الرصد غير كاف من أجل تحديد موقع هذا المركز على سطح الأرض. ويمكن تحديد هذا الموقع بدءاً من ثلاث محطات تقع حولها، حيث ترسم ثلاث دوائر يكون مركزها المرصد ونصف قطرها يساوي بعد المحطة عن المركز السطحي. وتكون النقطة التي تتقاطع فيها هذه الدوائر هي موقع المركز السطحي (شكل ٩-٨).




شكل ٩-٨: يوضح الطريقة المستعلمة في تحديد المركز السطحي للزلازل.

أ - تحديد بعد المركز السطحي عن محطة الرصد.

ب - تحديد موقع المركز السطحي من تقاطع ثلاث دوائر.

## شدة الزلازل ومقدارها

**أ ـ شدة الزلازل:** حاول العلماء منذ نهاية القرن الثامن عشر وضع عدد من المقاييس لتقدير شدة الزلازل earthquakes intensity التي تعتمد على الأضرار التي تنجم عنها ومدى احساس الانسان بها. فقد وضع العالمان روسي وفوريل Rossi & Forel سلماً لتصنيف الزلازل إلى عشر درجات تبدأ بالزلازل الخفيفة التي لا يمكن كشفها إلا بوساطة أجهزة التسجيل وتنتهي بالهزات المفجعة التي تؤدي إلى دمار شامل. ولكن أجريت تعديلات على هذا السلم من قبل العالم الايطالي ميركالي Mercalli حيث صنفت فيه الزلازل في اثنتي عشرة درجة.

الدرجة ١ـ يكون الزلزال غير ملحوظ ويتألف من هزات مجهرية لا تسجلها إلا الأجهزة.

الدرجة ٢ـ يكون الزلزال ضعيفاً جداً. يشعر به عدد قليل من أُناس عصبي المزاج وهم في حالة من الهدوء.

الدرجة ٣ ـ يكون الزلزال ضعيفاً، يشعر به بعضهم في داخل المباني وبخاصة في الطوابق العليا.

الدرجة ٤ـ يكون الزلزال معتدلاً، يُلحظ قليلاً خارج المباني ويكون أكثر وضوحاً في داخل المباني، (ترتجف الأبواب والزجاج وترن الصخور رنيناً خفيفاً) ويشعر الناس به بما يشبه اصطدام شاحنة بمبنى اسمنتي.

الدرجة ٥ـ يكون الزلزال قوياً تقريباً، يشعر به كل إنسان، ويسبب ايقاظ النائمين وقرع أجراس الكنائس، ويهز جميع الأشياء التي لها ارتفاع كبير.

الدرجة ٦ـ يكون الزلزال قوياً يشعر به الجميع وتتكسر الأواني والصحون وتتشقق طلاءات الجدران ويؤدي إلى اضطراب في أثاث المنزل.

الدرجة ٧ـ زلزال قوي جداً. ويؤدي إلى ذعر عام، وينقلب فيها أثاث البيوت، وتتشقق الجدران وتتهدم الأبنية ضعيفة الأساس.

الدرجة ٨ ـ يكون الزلزال مخرباً ويحدث دماراً خفيفاً في المباني جيدة التصميم، وتتهدم المباني الضعيفة الأساس وجزء من المباني العادية، وتنهار النصب التذكارية وأعمدة المصانع والدعامات.

الدرجة ٩ـ يكون الزلزال مدمراً تتأثر به المباني الحجرية بشدة وقد يؤدي إلى هبوطها في أماكن التشققات الأرضية.

الدرجة ١٠ـ زلزال كارثي. يؤدي إلى شقوق عريضة في سطح الأرض، وتهدم كثير من المباني، والتواء السكك الحديدية وانزلاقات في الأراضي على طول المنحدرات.

الدرجة ١١ـ زلزال مدمرة لا يبقى سوى عدد قليل من الأبنية الصامدة، وتحصل شقوق عريضة في القشرة الأرضية وانزلاقات أرضية عديدة.

الدرجة ١٢ـ يسبب الزلزال في هذه الدرجة دماراً شاملاً. وتبلغ فيها تشوهات القشرة الأرضية أبعاداً هائلة ولا يسلم منها أيُّ بناء.

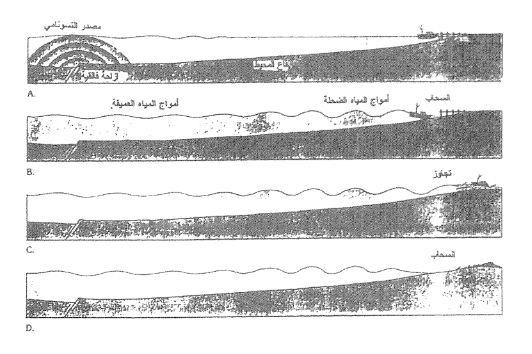
وعلى هذا الأساس، فإن بالامكان، عند حدوث زلزال أرضي، أن نميز نطاقات محددة كل منها بشدة أفعال الزلزال، ويمكن تمثيل حدود هذه النطاقات على خريطة بوساطة منحنيات تدعى منحنيات تساوي شدة الزلزال (شكل ٩ـ١)، وتشاهد الأفعال الأعظمية في النطاق المركزي الذي يحيط بالمركز السطحي للزلزال.

إذا تمكنا من معرفة لحظات تلقي الزلزال، وجمعنا على خريطة النقاط التي تم فيها الاحساس بالزلزال في وقت واحد، فإن بامكاننا أن نرسم منحنيات تساوي شدة الزلزال التي تعطي معلومات دقيقة عن سرعة انتشار الموجات الإهتزازية. وتبين هذه الموجات بأن السرعة تتغير مع طبيعة الأراضي التي تخترقها الموجات، وأن خطوط التخلعات التكتونية تعكس الموجات الإهتزازية.

عند مراقبة اتجاه وميل الشقوق التي أحدثها الزلزال في سطح الأرض، يصبح من الممكن بصورة تقريبية، تحديد موقع البؤرة الزلزالية. ويعتقد أن هذه البؤرة تقع داخل

الجسم الصلب للغلاف الصخري Lithosphere.

وعندما يحدث الزلزال في البحر فإنه يسبب أمواج مد tidal waves تصل إلى ارتفاع كبير جداً تدعى تسونامي Tsunami. وإذا رافق وجود الزلزال تغيرات عنيفة في قاع المحيط بخاصة حدوث صدع في قاعه، فإن كتلة الماء تغور فجأة في المكان الهابط، ثم تدخل في حركة اهتزازية. وعند الاقتراب من الشاطئ، حيث يتناقص عمق البحر، وتتناقص كتلة الماء، فإن سعة الموجة الاهتزازية تزداد ازدياداً كبيراً، تمر من متر واحد إلى عشرات الأمتار أحياناً (شكل ٩ـ١٠). فتسبب في هذه الحالة أضراراً بالغة على الشواطئ التي تبلغها. كما حدث في حزيران عام ١٨٩٦ على شاطئ المحيط الهادي شمال اليابان. حيث طغى البحر على خط الشاطئ بسرعة ووصل إلى ارتفاع استثنائي لم يصل إليه في أي وقت مضى. وقد أدت أمواج المد هذه إلى قتل نحو ٢٧١٢٢ شخصاً وجرح الآلاف وجرف نحو ١٠٦١٧ منزلاً ودمر كثيراً غيرها.




**شكل ٩ـ١٠: رسم تخطيطي لموجات التسونامي الناجمة عن ازاحة فالقية في قاع المحيط.**

**ب ـ مقدار الزلازل Magitude:** يعطينا مقياس ميركالي معلومات جيدة حول التأثيرات التي تسببها الزلازل في المباني والمنشآت. إلا أن معظم الزلازل تحدث في مناطق غير مأهولة. يضاف إلى ذلك أن عوامل مختلفة يمكن أن تؤدي إلى أضرار متفاوتة، منها البعد عن المركز السطحي وطبيعة الأراضي التي تخترقها الموجات الزلزالية ونوعية المباني والمنشآت. ثم إن هذا المقياس لا يوفر المعلومات اللازمة عن الحركات الموجية الزلزالية ومقدار الطاقة المتحررة. وقد أدى ذلك إلى وضع طرائق لتحديد كمية الطاقة المتحررة بوساطة الزلازل، ويعبر عن هذا القياس بالمقدار mgnitude الذي يرتبط بسعة الموجات الزلزالية. ويستعمل اليوم مقياس ريختر Richter Scale لوصف مقدار الزلازل، الذي استخدم فيه أجهزة ذات تقانية خاصة، يتم بوساطتها قياس الموجة الزلزالية قياساً علمياً موضوعياً مميزاً بأرقام سواء أكان حدوث الزلازل في مناطق معزولة مثل سيبريا أم في مدن مكتظة بالسكان مثل سان فرانسيسكو. ويتم حساب المقدار بتقدير قيمة سعة أكبر موجة زلزالية ترسم على جهاز سيسموغراف خاص الذي يفترضه ريختر أنه يقع على مسافة (١٠٠) كيلومتر من المركز السطحي للزلزال. وبما أن الزلازل تختلف بشكل كبير في قوتها فإن سعة الموجات الزلزالية المتولدة تتغير الوف المرات أيضاً، ولاستيعاب هذا التغيّر الواسع فقد استعمل هذا العالم مقياساً لوغارتيمياً للتعبير عن المقدار، فعلى هذا المقياس فإن ازدياد عشرة أضعاف السعة الموجية يقابل وحدة واحدة في مقياس المقدار، لذلك فإن سعة أكبر موجة سطحية لزلزال مقداره (٥) هي أكبر بعشر مرات من السعة الموجية الناتجة من زلزال مقداره (٤). إضافة إلى ذلك فإن وحدة واحدة من مقياس ريختر تعادل تقريباً زيادة (٣٠) مرة من الطاقة المتحررة. وعلى هذا فإن زلزال مقداره (٧,٥) يحرر طاقة أكبر بـ (٣٠) مرة من الطاقة المتحررة بزلازل مقداره (٦,٥) وأكبر بـ (٢٧٠٠٠) من الطاقة المتحررة من زلزال مقداره (٤,٥). ومن حسن الحظ أن الزلازل التي تزيد سعتها تنقص في ترددها (جدول ٩ـ١). وفي كل عام يحدث نحو (٨٠٠,٠٠٠) زلزال بمقدار (٣,٤) أو أقل، تسجلها الأجهزة ولا يشعر بها الناس في مناطق حدوثها.

| مقدار الزلزال | معدل حدوثها السنوي | المساحة المتأثرة (كم$^{٢}$) | الطاقة المتحررة بالإرغة |
|---|---|---|---|
| ٣ - ٣,٩ | ٣٠٠٠٠ | ١٩٥٠ | $٧,٩ \times ١٠^{١٣} - ١,٨ \times ١٠^{١٧}$ |
| ٤ - ٤,٩ | ٤٨٠٠ | ٧٧٧٠ | $٢,٥ \times ١٠^{١٧} - ٥,٦ \times ١٠^{١٨}$ |
| ٥ - ٥,٩ | ٥٠٠ | ٣٨٨٥٠ | $٧,٩ \times ١٠^{١٨} - ١,٨ \times ١٠^{٢٠}$ |
| ٦ - ٦,٩ | ١٠٠ | ١٢٩٥٠٠ | $٢,٥ \times ١٠^{٢٠} - ٥,٦ \times ١٠^{٢١}$ |
| ٧ - ٧,٩ | ١٨ | ٥١٨٠٠٠ | $٧,٩ \times ١٠^{٢١} - ١,٨ \times ١٠^{٢٣}$ |
| ٨ - ٨,٩ | واحدة في كل (٥-١٠) سنة | ٢٠٧٢٠٠٠ | $٢,٥ \times ١٠^{٢٣} - ٥,٦ \times ١٠^{٢٤}$ |

**جدول ٩-١: مقدار الزلازل وتواترها السنوي وكمية الطاقة المتحررة.**

وهناك اعتقاد شائع بأن تكرار حدوث الزلازل الخفيفة يمنع حدوث الزلازل الشديدة، حيث تبدد الطاقة المختزنة في الصخور. فإذا تذكرنا أن حدوث زلزال مدمر مقداره (٨) يحرر من الطاقة ما يعادل (٨١٠٠٠٠)ضعفاً مما يحرره زلزال مقداره (٤). فإذا افترضنا أن زلزالاً مقداره (٨) يحدث كل (١٠٠) سنة. وعلى ذلك يكون تبدد الطاقة التي يمكن أن تسبب زلزالاً بالدرجة (٨) يتطلب حدوث (٨١٠٠) زلزالاً مقداره (٤) كل سنة. وهذا العدد هو أكبر من عدد الهزات المتوقع حدوثها في العالم. وبذلك نستطيع أن نستنتج أن المخزون الضخم للطاقة لا يمكن أن يتحرر إلا عن طريق زلزال مدمر ولا يمكن للزلازل الخفيفة أن تقوم بدور صمام أمان يحمي من حدوث الزلازل المدمرة.

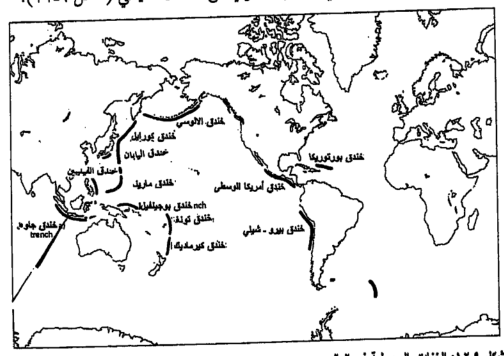
## الأحزمة الزلزالية Earthquake belts

لا تنتشر الزلازل بصورة عشوائية على سطح الأرض، وإنما نجد أن مراكزها تتوزع في ثلاثة نطاقات تتكرر فيها حدوث الزلازل من وقت لآخر. تعرف هذه النطاقات بالأحزمة الزلزالية. وتكون هذه الأحزمة مترافقة مع النشاط البركاني والسلاسل الجبلية حديثة التكوين وهي: ١- حزام زلزالي يطوق المحيط الهادي. ٢- حزام زلزالي عرضي

بكاد يتمشى مع السلاسل الجبلية حديثة التكوين. ٣- حـزام زلـزالي يمتـد علـى طـول نظام مرتفعات وسط المحيط الأطلسي من الشمال إلى الجنوب (شكل٩-١١،ص ).

**١- حزام المحيط الهادي أو حلقة النار:** وهي مناطق تكون فيها الزلازل عنيفة جداً. ويمتد هذا النطاق مـن شـيلي إلى أمريكـا الوسـطى، المكسيك، كاليفورنيـا، غـرب كندا، الآسكا، جزر اليابان، الفيلبين، أندونيسـيا ونيوزلنـدا. ويسـمى هـذا النطـاق أيضاً حلقة النار. ويحدث فيه أكثر من ٧٥٪ من زلزال العالم.

ولقد قام العالمان غوتنبرغ وريختـر عـام ١٩٤٩ بدراسـة أطـراف المحيـط الهـادي بصورة خاصة، وانتهيا إلى وضع خرائط تبين مواقع الـزلازل الضحلـة الـتي يـتراوح أعماق بؤرها الزلزالية من (٠ - ٧٠كـم) والـزلازل المتوسـطة مـن (٧٠ـ٣٠٠كم) والزلازل العميقة من (٣٠٠ ـ٧٠٠كم). وقد تبين لدى الدراسات التي تمت من قبل مرصد لامونت دورتي Lamont Doherty عـام ١٩٨٦ أن تـوزع الـزلازل مـن الأسكا وباتجاه الطرف الغربي للمحيط الهادي، وفي الشاطئ الشرقي منه الممتد مـن أمريكا الوسطى إلى أمريكا الجنوبيـة، تتبـع الخنـادق المحيطيـة العميقـة ومترافقـة مـع الأقواس البركانية. وتحدث في الجانب القاري من الخندق المحيطي (شكل ٩-١٢).

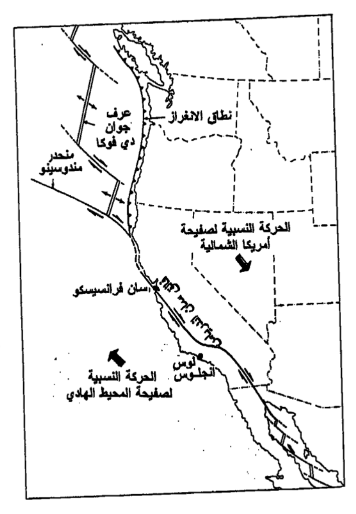



شكل ٩-١٢: الخنادق المحيطية في العالم

إن الخنادق المحيطية هي الأماكن التي تنحني فيها الصفيحة المحيطية وتغوص في المعطف. وقد وجد العلماء أن مركز الصفيحة المنغرزة، التي تبلغ سماكتها نحو (١٠٠)كيلومتر، وتغوص بمقدار بضعة سنتمترات سنوياً، سيبقى صلباً حتى عمق (٦٠٠-٧٠٠) كيلو متر. أي أنه في هذه الحالة يمكن أن تحدث زلازل ذات بؤر عميقة من خلال تحرر الطاقة المرنة التي اختزنت في الصفيحة الصلبة الهابطة أثناء مقاومتها لحركة الهبوط. وبالوقت نفسه تحدث زلازل ضحلة في الصفيحة القارية نتيجة الإجهاد الناجم من انغراز الصفيحة المحيطية تحتها.

ولقد تبين من الدراسات المكثفة التي قام بها العالم الأمريكي بينوف Benioff حول توزع البؤر الزلزالية، أن الزلازل تحدث في نطاق ينحدر بدءاً من الخندق المحيطي وباتجاه القارة بزاوية قدرها (٤٥) درجة. وقد عرف هذا النطاق باسم نطاق بينوف، حيث تزداد أعماق البؤر مع زيادة المسافة من الخندق (شكل٩-١٣،ص ). أي أن معظم الزلازل الضحلة تكون قريبة من الخنادق المحيطية، وتقع الزلازل المتوسطة والعميقة بعيدة عنها ولقد أوضحت المعلومات الزلزالية أن الزلازل ذات البؤر الضحلة قد وصلت إلى (٨,٦) على مقياس ريختر، بينما كانت شدة الزلازل المتوسطة تحت (٧,٥). أما الزلازل ذات البؤر العميقة فلم تتجاوز (٦,٩) في مقدارها.

أما الزلازل في الساحل الغربي لأمريكا الشمالية وبخاصة في ولاية كاليفورنيا، فإنها تحدث نتيجة انزلاق صفيحة المحيط الهادي بمحاذاة صفيحة أمريكا الشمالية على طول فالق سان اندرياس (شكل ٩-١٤). حيث يتراكم الضغط على جانبي الفالق ويتم تحرير هذا الضغط في شكل زلزالي، كالزلزال الذي دمَّر مدينة سان فرنسيسكو عام ١٩٠٦.




شكل ٩ـ١٤: فالق سان اندرياس

**٢ـ حزام البحر المتوسط وعبر أسيا Mediterranean and Trans- Asiatic belt:**

يتبع هذا الحزام السلاسل الجبلية حديثة التكوين. ويمتد على طول أقواس جبال الألب لأوربا وشمال أفريقيا عبر آسيا الصغرى (تركيا) والقوقاز وإيران والباكستان إلى بامير Pamir وهيمالايا والتيبت والصين. يتميز هذا النطاق بأن أغلب الزلازل الكبيرة التي تحدث فيه ذات بؤر ضحلة ومتوسطة. وقد كان يعتقد أن هذا الحزام خالٍ من الزلازل ذات البؤر العميقة. ولكن الزلزال الذي حدث في عام ١٩٥٤

كانت بؤرته على عمق (٦٣٠) كيلومتراً تحت جنوب منحدرات جبال سيرانيفادا في اسبانيا. قد غيّر رأي العلماء الذين كانوا يعتقدون أن هذه السلاسل ناجمة من اصطدام الصفائح القارية. وبدأت الأبحاث للتحري فيما إذا كان يوجد فيها خنادق محيطية قديمة.

**٣- حزام نظام مرتفعات وسط المحيطات:** يتوافق هذا الحزام مع مرتفعات وسط المحيطات. ونظراً لقرب مرتفع وسط المحيط الأطلسي من القارتين الأوربية والأمريكية فقد نال اهتماماً كبيراً من قبل الباحثين. حيث يتراوح ارتفاع أعالي السلاسل الجبلية المؤلفة له ما بين ٢٥٠٠ إلى ٣٠٠٠ متر فوق سطح قاع المحيط. وقد تبرز في بعض الأماكن فوق مستوى سطح البحر كما هو الحال في جزيرة ايسلندا. وتتألف مرتفعات وسط المحيطات من طبقات من صخور البازلت المتصدعة والمدفوعة إلى أعلى. وتتميز هذه المرتفعات بوادٍ عميق عند محوره تخرج منه اللابات البازلتية الجديدة، التي تضاف باستمرار وبالتساوي تقريباً لكلتا الصفيحتين المحيطيتين المتباعدتين.

تحدث الزلازل على طول أعراف وسط المحيطات وعلى امتداد فوالق التحويل transform faults التي تقطعها (شكل ١١ -٣١) وتكون الزلازل في هذا الحزام خفيفة وتمثل نسبة قليلة من الزلازل التي تحدث في العالم.

## تأثيرات الزلازل:

يهتم معظم الناس بالهزات الأرضية بسبب تأثيراتها على القشرة الأرضية والكائنات البشرية وعلى أعمال البناء والتشييد. ومن بين كل الهزات التي تحدث سنوياً وتثير الاهتمام واحدة أو اثنتان، حيث تحدث فيها انزلاقات أرضية وانخفاض الكتل الأرضية أو ارتفاعها. ونحو المائة منها تكون قوية قرب مراكزها إلى حد يكفي لتدمير الحياة الإنسانية وملحقاتها. لكن الهزات الباقية تكون ضعيفة جداً لا تترك تأثيرات خطيرة.

**النار:** تكون النار التي يسببها الزلزال أكبر خطراً من الزلزال نفسه. ويكون

مصدرها تهدم المواقد وانقطاع الأسلاك الكهربائية أو انقلاب المصابيح. وقد يكون سبب اشتعال النيران المواد الكيميائية، كالزلزال الذي حصل في مدينة طوكيو عام ١٩٣٢. حيث دمرت النار ما يقرب من ٩٥٪ من الخسارة الاجمالية لهذا الزلزال. فبعد مضي ثلاثين دقيقة من بداية حدوثه كانت النار قد اشتعلت في (٣٥٢) مكاناً من طوكيو. وجاءت رياح بسرعة كبيرة في اتجاهات مختلفة، أدت إلى امتداد المنطقة المحترقة بشكل كبير. وخلال (٥٦) ساعة كانت نسبة ٧١٪ من منازل طوكيو قد احترقت و٩٩٣٣٣ شخصاً توفوا و١,٣٧٣٣ شخصاً تشوهوا بالحروق.

**تدمير المباني والمنشآت:** تسبب الزلازل دماراً كبيراً في المنشآت، وذلك لأن الموجات الزلزالية تؤدي إلى اهتزاز الأرض فتحركها أفقياً وشاقولياً بطريقة معقدة. ففي زلزال آلاسكا عام ١٩٦٤، لحق ضرر كبير بالمباني، بالرغم من أنه روعي في بنائها مواصفات المباني المقاومة للزلازل. وذلك يعود إلى الفترة الزمنية التي استغرقها الزلزال، والتي قدرت بنحو (٣ـ٤) دقائق، مع أن معظم الزلازل لها اهتزازات تدوم من ٢٠ ثانية إلى دقيقة واحدة.

قد تسبب الزلازل اختلال النظام المائي في المنطقة. فمثلاً كسر وصدع نحو (٢٣٠٠٠) انبوب مائي في سان فرانسيسكو بسبب الزلزال الذي حدث عام ١٩٠٦ واندفع منها تيار مائي ملأ بضغطه العالي جوانب المدينة والمنازل. ومنذ ذلك الوقت اتخذت التدابير الإحتياطية. حيث وضعت صمامات لتعزل المنطقة المتأثرة وتحتفظ بضغط الماء العالي في أنحاء المدينة كافة.

إن المباني الحديثة التصميم والمسلحة بالحديد تقاوم فعل الزلازل العنيفة. ولقد دمر الزلزال الذي ضرب مدينة طوكيو عام ١٩٢٣ المباني القديمة من حول بنك ميتسوبيتشي وبقي البنك سالماً. ولم تستطع الموجات الاهتزازية لزلازل عام ١٩٥٧ من تدمير البرج في مدينة مكسيكو في أمريكا اللاتينية، بينما تأثرت المباني المجاورة له. أما الأنفاق الأرضية والمنشآت المبنية تحت الأرض فهي قليلة التأثر بأعنف الهزات الزلزالية.

إن شدة تأثر البناء بالموجات الاهتزازية يعتمد جزئياً على طبيعة الأرض التي

أسست عليها المباني. ففي الزلزال الذي اجتاح مدينة سان فرنسيسكو عام ١٩٠٦ عانت المدينة (١٢) ضعفاً مما عانته المباني المجاورة، وذلك لأن أساس المدينة تربة رملية حصوية غضارية مشبعة بالمياه، لأن هذه التربة غير متماسكة وتعمل على تضخيم الاهتزازات إلى درجة أكبر من الطبقات الصخرية المتماسكة.

**التغيرات في مستوى سطح البحر:** تُحدث الزلازل تغيرات في مستوى سطح البحر، يمكن ملاحظتها من الثقوب التي تتكون في بعض الصخور الشاطئية بفعل بعض الحيوانات البحرية فمثلاً شوهد آثار حيوان بحري عرف باسم ليتوفاغا Lithophaga بمحاذاة الشاطئ القريب من طوكيو في اليابان. يعيش هذا الحيوان داخل زوج من الأصداف. ويحفر بيته في الشاطئ الصخري بمستوى سطح البحر. ولقد شوهدت في مكان ما من الشاطئ حفر مهجورة وأنفاق حفرتها هذه الحيوانات في أربعة مستويات مختلفة فوق مستوى سطح البحر. وقد دلت السجلات التاريخية على أن كل نهوض اعترى سطح الأرض كان بسبب هزة أرضية ضربته. ففي خلال الأعوام ٣٣، و٨١٨ و١٧٠٣ و١٩٢٣ بلغ مجموع النهوض نحو (١١) متراً في مدى (١٨٠٩) أعوام. ويبدو أن هذا التغيير ليس كبيراً، ولكنه إذا استمر بالمعدل نفسه لمدة (٢٠٠,٠٠٠) عام أخرى. فإن النهوض سيبلغ نحو الكيلومتر. وتعد هذه الحركة بالنسبة للعصور الجيولوجية حركة سريعة.

**الانزلاقات الأرضية:** يرافق عادة حدوث الزلازل في المناطق التي تكثر فيها المنحدرات الشديدة انزلاقات أرضية. وتحدث هذه الانزلاقات في منطقة نادراً ما يزيد نصف قطرها (٣٥ ـ ٥٠) كيلومتراً عن مركز الهزة السطحي. ففي مقاطعة كانسو Kansu في الصين وفي توضعات اللوس ضربت المنطقة هزة أرضية عام ١٩٢٠ وسببت أكثر مظاهر الانزلاقات الأرضية وضوحاً، ودفع ضريبتها نحو (١٠٠,٠٠٠) مواطن.

**الصوت:** عند حدوث زلزال في منطقة ما، فإن اهتزازات الأرض تؤثر في الغلاف الجوي المحيط بها. وتحدث أمواجاً صوتية في مدى سمع الإنسان. وتعرف هذه الأصوات بأصوات الهزة الأرضية. وقد وصفت هذه الأصوات بأشكال مختلفة.

وتكون عادة كأنين منخفض وأصوات انفجارات. وتسمع عادة في مكان قريب جداً من مركز الهزة أصوات حادة شبيهة غالباً بسقوط صخرة هائلة. وتشبه الأصوات الأبعد من ذلك بعربات ثقيلة تمر مسرعة على أرض صلبة. أو بصوت قصف الرعد أو صوت قصف مدفعية ثقيلة تقصف من مسافة بعيدة. وبالطبع فإن صوت الهزة الأرضية مميز تماماً بسبب تهدم وهدير المباني المهتزة.

## التنبؤ بالزلازل:

تأتي اليابان في طليعة الدول المهتمة بإمكان التنبؤ بحدوث الزلازل نظراً لموقعها الجغرافي ضمن حزام زلزالي نشط. فقد أقاموا شبكة معقدة من أجهزة الرصد الزلزالي تمتد داخل المحيط الهادي قرابة (٢٠٠) كيلومتر. ففي قاع المحيط تقل نسبة التشويش الاهتزازي إلى الحدود الدنيا، لذلك يمكن لأجهزتها أن تسجل بدقة مختلف الحركات الأرضية، بما فيها الانحناءات الصخرية والحركات الفالقية ومختلف الاهتزازات الزلزالية الناجمة منها، وأهمها موجات مقدمة الصدمة التي تسبق حدوث زلزال كبير. وقد اقيمت شبكات الرصد الزلزالي في بعض مناطق الولايات المتحدة التي تتسم بالاهتزازات الزلزالية. وتقام في معظم أنحاء العالم شبكات مماثلة.

وعلى الرغم من عدم توافر وسائل علمية دقيقة يعتمد عليها بالتنبؤ قبل وقوعها ولو بقليل، فقد أمكن التنبؤ بحدوث زلزال طشقند في الاتحاد السوفيتي عام ١٩٦٦ عن طريق تتبع نسبة غاز الرادون في الآبار ـ فالرادون هو غاز خامل ينشأ من التفكك الإشعاعي للراديوم، ويمكن أن يوجد بنسب قليلة في بعض أنواع الصخور وعادة يكون هذا الغاز محتبساً داخل الصخور إلا أنه يتحرر منها بنتيجة تراكم الاجهاد على هذه الصخور وحدوث تشققات جديدة فيها.

وفي شباط ١٩٧٥ أمكن التنبؤ بحدوث زلزال كبير في شمال شرق الصين قبل ساعات قليلة. وبنتيجة التحذير والتقيد بالتعليمات أمكن إخلاء البيوت والمنشآت من عدد يقرب من ثلاثة ملايين نسمة، أمضوا جميعهم أمسية شديدة البرودة في مناطق صحراوية، وأمكن انقاذ عشرات الآلاف من الأرواح. وقد أكدت التقارير التي وردت بعد حدوث هذا الزلزال على أن أضراراً فادحة لحقت نحو ٩٠٪ من

أبنية مدينة هاي شنغ Haicheng. فقد ساعد رصد موجات مقدمة الصدمة التي سبقت هذا الزلزال على هذا التنبؤ.

ولسوء الحظ استطاع الصينيون التنبؤ بحدوث زلازل قوي في منطقة تانغ شان Tang Shan عام ١٩٧٦ إلا أنهم لم يتمكنوا من تحديد تاريخ دقيق لحدوث الزلزال. فقد حدث هذا الزلزال وأدى إلى قتل ما يقرب من ٦٥٠,٠٠٠ نسمة وجرح نحو ٧٨٠,٠٠٠. فقد كان التحذير من وقوع هذا الزلزال طويل الأمد وغير دقيق الموعد. ونضيف إلى ذلك امكان صدور تحذيرات خاطئة، فقد صدر تحذير خاطئ في الصين في أقليم مجاور لهونغ كونغ أجلي من جرائه السكان من منازلهم لمدة شهر تقريباً و لم يحدث الزلزال. وعلى ذلك يجب أن يكون البحث والتحري عن حدوث الزلازل دقيقاً جداً حتى يُتخذ القرار باخلاء المساكن. فإجلاء السكان في مدن مكتظة مثل لوس انجلوس سوف ينجم عنه خسائر مادية فادحة تشمل ضياع الوقت وتكاليف إخلاء المساكن والمنشآت إضافة إلى الحوادث التي يمكن أن يسببها الهلع. لذلك يجب أن يكون التنبؤ بحدوث الزلازل مبنياً على أساليب علمية دقيقة وموثوقة جداً.

أما التحكم بحدوث الزلازل فهو أمر آخر. فقد تبين لعلماء الزلازل امكانات تحريض حدوث الزلازل بوسائل اصطناعية وهذا ما شجع العلماء على متابعة هذا المجال. ففي الفترة الواقعة بين عامي ١٩٦٢ - ١٩٦٦ أجريت دراسات رصد زلزالي في منطقة ارسنال Arsenal في جبال روكي الأمريكية، وهي منطقة هادئة لم تشهد أحداثاً زلزالية منذ نحو (٨٠) سنة قبل عام ١٩٦٢. ومنذ هذا التاريخ بدأت المنشأة الكيميائية المقامة في أرسنال بضخ النفايات الكيميائية في الأرض داخل آبار عميقة تزيد على ٣٦٠٠متر.

وقد سجل الرصد الزلزالي الذي أجري بين نيسان ١٩٦٢ وأيلول عام ١٩٦٥ حدوث نحو (٧٠٠) زلزال صغير منها ٧٥ زلزالاً شعر به الإنسان. فقد أدى حقن مياه النفايات في أعماق الأرض إلى تسهيل تحرك الكتل الصخرية على امتداد الشقوق والفوالق، والتي كان الاجهاد يتراكم فيها على مدى سنين طويلة. وعندما

أوقف ضخ هذه النفايات لمدة سنة لوحظ تناقص واضح في النشاط الزلزالي، ثم عاد بعد استئناف الضخ. ولقد وقعت أيضاً أحداث زلزالية سببها نشاط الإنسان في مناطق مجاورة لبحيرات السدود. فقد حدثت مئات الزلازل في المناطق الواقعة بين ولايتي أريزونا ونيفادا إثر ملء بحيرة سد ميد Mead. حيث أدى ملؤها إلى زيادة الوزن على الصخور المبنية فوقها، وقد زاد في تنشيطها تغلغل مياه البحيرة عميقاً داخل الأرض. وكذلك أدى تخزين الماء في بحيرة كبيرة خلف سد رئيسي في الهند إلى تحريض حدوث زلزال مدمر أدى إلى قتل ما يقرب من ٢٠٠ نسمة.

يمكن أن يضاف إلى تأثير بحيرات السدود في تحريض الزلازل التفجيرات النووية القوية التي تقوم بها بعض الدول الكبرى تحت الأرض. إلا أن هذه التفجيرات على الرغم من طاقتها الهائلة لم تؤدي إلا لحدوث زلازل صغيرة لا تتناسب مع قوة هذه التفجيرات. ويبقى الأمل في إمكان توصل العلماء في المستقبل إلى التقليل من أخطار الزلازل المدمرة، عن طريق تحريض حدوث زلازل خفيفة، إما بضخ الماء في باطن الأرض، أو عن طريق التفجيرات النووية، بحيث يتم تحرير أجزاء من الطاقة المختزنة في الصخور المجهدة. وهنا لا بد من التذكير أن الزلزال الكبير يتطلب تحريض ألوفاً من الزلازل الصغيرة حتى يُفرغ جزءاً من طاقته. ويتطلب هذا المجال إجراء الكثير من الاختبارات الدقيقة في مناطق نائية، قبل الدخول في مخاطرات يتم تطبيقها على الفوالق الكبرى مثل فالق سان اندرياس المار من مناطق مكتظة بالسكان.

## فوائد الزلازل:

مع أن حدوث الهزات الأرضية (أو الزلازل) ينتج عنه أضرار كبيرة في بعض الأحيان، إلا أن أحداث وقوع الزلازل نفسها تعد وسائل فعالة تساعد العلماء على دراسة باطن الأرض. فمن الممكن أن تصل الملاحظات العلمية حول باطن الأرض إلى أعماق محدودة جداً، عن طريق الحفر البئري الآلي، لا تزيد بأية حال على (١٥) كيلومتراً تحت السطح. وبذلك لا توجد وسيلة مباشرة لمعرفة أعماق القشرة الأرضية أو المعطف الواقع تحتها أو نواة الأرض. ولأجل استكشاف هذه الأجزاء العميقة في باطن الأرض، يلجأ العلماء إلى وسائل غير مباشرة أهمها: طبيعة الأمواج

الاهتزازية المختلفة الناجمة من الزلازل وانتقالها في باطن الأرض عبر مختلف أجزائها. فبواسطة رصد هذه الأمواج في أماكن مختلفة من أنحاء العالم وإجراء قياسات دقيقة تُحدد أنواعها وسرعة انتقالها تمكن العلماء من رسم صور عملاقة لباطن الأرض تشبه صور باطن الإنسان بتقانات الأشعة السينية.

# الفصل العاشر

# البراكين

لقد أتت تسمية البراكين Volcanoes من فولكين Vulcain (الـه النـار) عنـد الرومان، فقد كانوا يعتقدون أن البراكين مداخـن مصـانع الحديـد لالـه النـار. وقـد شيدوا الهياكل لعبادة الآلهة في مظاهر أسوار المدن، ومنذ ذلـك الحين أطلقـوا على الجبال التي تنفث اللهب والدخان، وقطع الصخور واللابا اسم البراكين.

تمثل ظاهرة النشاط البركاني نوعاً من أنواع الحركـات الفجائيـة والباطنيـة الـتي تصيب القشرة الأرضيـة. وتكـون بعـض القشـرة الأرضيـة مقـراً لحادثـات تكتونيـة ترافقها حادثات بركانية حيث يتشقق سطح الأرض وينكسر وتخـرج منـه الغـازات والأبخرة واللابات إلى السطح مشكلة البراكين.

## طبيعة النشاط البركاني Nature of volcanic activity

ينظر عادة إلى النشاط البركاني على أنه عمليـة تنتـج أشكالاً مخروطيـة جميلـة، تُبنى من تراكم مواد مختلفة بثورانات شديدة من آن لآخر. ولكن في الحقيقة يشـمل النشـاط البركـاني اندفاعـات بركانيـة تحـدث بطرائـق متباينـة وتـؤدي إلى تشـكل تضـاريس بركانيـة بأشـكال مختلفـة، وذلـك حسـب طبيعـة اللابـا المندفعـة وكميـة

الغازات المرافقة ودرجة الحرارة.

## الحاصلات البركانية

### أ ـ الحاصلات البركانية الغازية

تحتوي المغما على كميات مختلفة من الغازات والأبخرة المنحلة، وهي تبقى محبوسة ما دامت تحت تأثير الضغط الحابس. وتبدأ هذه الغازات والأبخرة بالتحرر عند انخفاض الضغط المسيطر على المغما، فتندفع بقوة كبيرة إلى السطح. ولهذا السبب يكون تحديد كميتها وتركيبها من الأمور الصعبة.

يعتقد العلماء، اعتماداً على المعلومات المستمدة من النشاط البركاني بجزر هاواي، بأن بخار الماء وغاز ثنائي أوكسيد الكربون ($CO_2$) يشكلان نحو ٩٠٪ من مجمل الغازات المنطلقة. وأن مركبات النيتروجين تشكل نحو ٥٪، ومركبات الكبريت مع كميات أقل من الكلور والفلور والبور والأرغون بالإضافة إلى أنواع أخرى كثيرة تشكل نحو ٥٪.

إن معرفة التركيب الكيميائي للغازات المندفعة تشكل أهمية كبيرة، حيث أن الطبقات المؤلفة للغلاف الجوي قد تكون تكونت من هذه الغازات. وبالرغم من نسبتها الضئيلة التي تتراوح ما بين (١ـ٥) بالمائة من الحجم الكلي للابا المتدفقة، فقد تبلغ كميات هائلة. فقد بلغت كمية الأبخرة والغازات المنطلقة في الهواء في بعض الاندفاعات البركانية في الأسكا نحو (٢٣) مليون ليتر في الثانية، وبدرجة حرارة نحو (٦٠٠) درجة مئوية. ويمكن استخدام الأبخرة والغازات الأخرى ذات المنشأ البركاني كمنبع مهم للطاقة الكهربائية، وكذلك في بعض الصناعات الكيميائية.

بالاضافة إلى كون الغازات تشكل عاملاً مهماً في دفع المغما إلى فوهات البراكين، فإنه يعتقد أنها تساهم في تشكيل ممرات تصل حجرة المغما بسطح الأرض. ففي بداية الأمر، تؤدي الحرارة العالية للمغما إلى تصدع الصخور التي فوقها، مما يؤدي إلى اندفاع تيارات غازية حارة وذات ضغط مرتفع تقوم بتوسيع الصدوع وتتطور إلى ممرات تصل إلى السطح. وبعد إتمام هذه العملية تأتي الغازات

المسلحة بقطع صخرية بحت جدران الممرات وإزالة كل ما يعترضها في طريقهـا مـن نتـوءات وتكـوّن ممـرات واسـعة ذات مقطـع دائـري تعـرف بالأنـابيب البركانيـة volcanic pipes أو المداخن البركانية. وعندها تندفع المغما إلى الأعلى وتؤدي إلى التدفقات البركانية أو الانفجارات البركانية.

## ب ـ الحاصلات البركانية السائلة

تعد اللافا lava أو اللابا من أهم المنتجات السائلة للهيجانـات البركانيـة. فهـي صهارة سيليكاتيه سائلة ذات درجـة حـرارة تزيـد علـى (١٠٠٠°مئويـة)، تشبه في جميـع خواصهـا المغمـا الموجـودة في بـاطن الأرض، وتختلـف عنهـا باحتوائهـا علـى كميات قليلة من الغازات والأبخرة التي تتشبع بهـا المغمـات في الأعمـاق السـحيقة. وتخرج اللابا مـن فوهـة البركـان وشـقوقه وتسـيل إلى مسـافات تختلـف بـاختلاف تركيبها، وتصنف بالنسبة إلى كمية السيليكا ($SiO2$) فيها إلى:

**١ـ اللابا الحامضية Acidic lava:** تتراوح نسبة السيليكا في اللابـا الحامضيـة مـن ٦٥ ـ ٧٥٪، ويتصف هذا النوع بأنه قليل اللزوجة، يتصلب بسرعة معطيا الصخور المخترجة الحامضية. يرافق اندفاع هذا النوع من اللابا غازات وكميـات كبـيرة مـن بخار الماء، مما يؤدي إلى خروجها بقـوة انفجاريـة كبـيرة تتطـاير منهـا قطـع صغـيرة وكبيرة، وهي تتصلب وتتراكم حول فوهة البركان مختلطة مع اللابـا. وتـأخذ عـادة اللابا الحامضية شكل سيل قصير يشبه اللسان يمتـد علـى جوانـب البركـان مشـكلة مخروطاً بركانياً شديد الانحدار. تشـكل اللابـات الحامضيـة اللزجـة صبـات ضعيفـة الانتشار ذات سطوح ممزقة.

**٢ـ اللابا الأساسـية أو القاعديـة:** تكـون نسـبة السـيليكا فيهـا دون ٦٥٪ وتتمـيز بدرجة حرارتها التي تزيد على ١٢٠٠°مئوية وبحركتهـا الكبـيرة عنـد خروجهـا إلى سطح الأرض وجريانها لمسافات بعيدة مكونة سيولاً نارية.

تتصلب اللابا مباشرة بعد خروجها إلى سطح الأرض مشـكلة قشـرة سـطحية، لكن جزءاً منها تحت هذه القشرة يبقى سائلاً لمـدة طويلـة. ثـم لا تلبـث أن تنطلـق

الغازات المحتبسة على شكل انفجارات تؤدي إلى تكسر القشرة السطحية المتصلبة مشكلة كتلاً لابية متراكبة فوق بعضها بعضاً تدعى اللابات الكتلية.

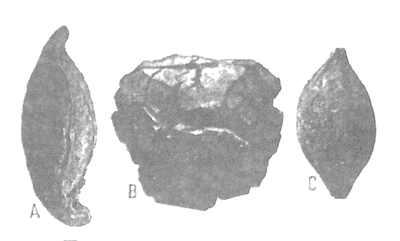
### جـ ـ الحاصلات البركانية الصلبة

تندفع كميات كبيرة من المنتجات الصلبة خلال فترة الهيجان البركاني نتيجة الضغط الكبير للغازات، وتحدث الانفجارات البركانية المتعددة. وتتألف هذه المنتجات من قطع صخرية آتية اما من تصلب اللابا المقذوفة في الهواء أو من تجزؤ السدادة التي كانت تغلق المدخنة، وأحياناً من جدران المدخنة نفسها. وقد تكون هذه القطع الصلبة عبارة عن صخور أعماق جرفت مع اندفاع اللابا. ونميز حسب حجوم هذه القطع: الرماد، والخبث، والقنابل البركانية. وتسهم هذه الحاصلات في بناء المخروط البركاني. وقد تحمل الرياح الرماد البركاني إلى مسافات بعيدة محدثة اضراراً كبيرة للنباتات.

تتراوح مقاييس القنابل البركانية من ٥ ــ ١٠سم وقد تصل أحياناً إلى عدة أمتار. ولها شكل مغزلي نتيجة الحركة اللولبية التي تأخذها اللابا بتأثير قوى الدفع الكبيرة، وقد تكون على شكل قشور (شكل ١٠-١). أما إذا كانت القطع أصغر من السابقة سميت اللابيات Lapilli وتبلغ مقاييسها من ١ــ٣سم. وإذا كانت القطع صغيرة جداً سميت الخبث البركاني والدقيقة منها تعرف بالرماد البركاني. وعندما تتوضع هذه المنتجات الصلبة على الأرض بعد قذفها عالياً في الهواء فإنها تجرف بمياه السيول وتعطي نوعين من الرواسب النارية:

١ـ رواسب نارية خشنة تشمل: الرصيص البركاني **volcanic agglomerate**، ،والبريش البركاني **volcanic breccia**، وتتميز الأولى بكون القطع الصخرية فيها مستديرة بينما في الثانية تكون زاويّة.

٢ـ رواسب نارية دقيقة تشمل أنواع الخبث والرماد البركاني، الذي يكوّن عند توضعه على سطح الأرض الطف البركاني **volcanic tuffa**.




شكل ١٠-١: يوضح أشكال القنابل البركانية

## أنواع البراكين

تصنف البراكين عادة حسب طريقة الاندفاع في نوعين رئيسين هما البراكين الانفجارية والبراكين الهادئة. فالاندفاعات البركانية الانفجارية تنجم من تحرر فجائي لضغوط هائلة متراكمة تزيد في وطأتها عمليات التحرر السريع للأبخرة والغازات، مما يؤدي إلى إنطلاق كميات هائلة من الفتات الناري pyroclasts انطلاقاً انفجارياً مخيفاً. أما الاندفاعات البركانية الهادئة فتتمثل بتدفقات للمغمات المتحررة من الفوهات البركانية لتسيل على المنحدرات متجهة للأماكن المنخفضة. وفي كثير من الحالات تتغير الاندفاعات البركانية من انفجارية إلى هادئة أو العكس.

يلعب محتوى المغمات من السيليكا دوراً مهماً في تحديد نوع النشاط البركاني، فيما إذا كان هادئاً أو انفجارياً. فكلما كانت نسبة السيليكا أعلى ازدادت لزوجة المغما، وإن المغما اللزجة تسد فوهات البراكين حين تتصلب ويخمد البركان، الأمر المؤدي إلى تراكم الضغوط الواقعة تحتها بشكل تدريجي حتى تصل قوتها إلى درجة تقتحم فيها السدادة ويحدث الانفجار البركاني. وتترافق الانفجارات البركانية عادة مع تدفق اللابات الأنديزيتية والريوليتية، لأن الانطلاق السريع للغازات المتحررة من هذه اللابات قد تؤدي إلى زيادة لزوجتها. أما الاندفاعات البركانية الهادئة تترافق

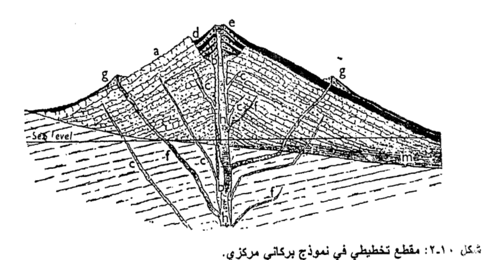
عادة مع اللابات البازلتية التي تتميز بلزوجة أقل وسيولة أكثر بسبب محتواها المنخفض من السيليكا.

إن التركيب الكيميائي الوسطي للقارات يتراوح إلى حد ما بين التركيب الريوليتي والتركيب الأنديزيتي، وإن التركيب الكيميائي الوسطي لقشرة المحيطات هو تركيب بازلتي، ولهذا فإن البركنة على اليابسة تميل لأن تكون انفجارية بينما تميل البركنة في المحيطات إلى التدفق الهادئ.

## البراكين والاندفاع البركاني

يبني الاندفاع البركاني volcanic eruption المتتابع تراكماً جبلياً من المواد المقذوفة تتخذ غالباً شكلاً مخروطياً. وهو الشكل المألوف الذي يتبادر إلى الذهن عند ذكر البراكين. يقع فوق قمة المخروط فوهة crater، قد تكون في بعض البراكين على شكل تجويف عميق، ذي جدران شديدة الانحدار يتراوح قطره من بضعة أمتار إلى بضعة كيلومترات. ويتصل تجويف الفوهة بمدخنة تمر منها المنتجات البركانية إلى سطح الأرض. وقد تتصل المدخنة الرئيسة في بعض البراكين بمداخن ثانوية تخرج منها اللابات إلى سطح الأرض أثناء ثوران البركان، وتشكل مخاريط بركانية بحجوم صغيرة تتوضع على الجوانب المنحدرة للمخروط الرئيس. ويعرف هذا النموذج بالبراكين ذات المداخن المركزية (شكل ١٠-٢).

ونظراً لاختلاف الظروف المؤدية إلى تشكل البراكين فإنها تأخذ أشكالاً وحجوماً مختلفة. وقد جمع الجيولوجيون البراكين المتشابهة في طريقة اندفاعها وأشكال مخاريطها في مجموعات ثلاث وهي البراكين الدرعية shield volcanoes والبراكين المركبة composite volcanoes وبراكين الرماد cinder volcanoes.



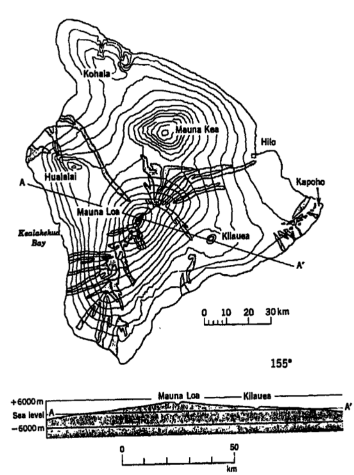

شكل ١٠-٢: مقطع تخطيطي في نموذج بركاني مركزي.

يوضح المدخنة المركزية h والمداخن الثانوية f، c. كما يوضح المخروط البركاني a ومخاريط بركانية بحجوم صغيرة g.

## ١- البراكين الدرعية

وهي هيئات بركانية تتشكل من تتابع تدفقات من اللابات البازلتية شديدة السيولة، تأخذ شكل قباب منخفضة وواسعة. حيث تخرج اللابات من فوهة مركزية أو من شقوق بركانية، وتتدفق على شكل سيل ناري بسرعة تبلغ نحو (٤-٥) م/ثا وقد تصل إلى نحو ٨ م/ثا في أسفل المنحدرات. تنطلق الغازات في هذا النوع بسهولة دون أن تحدث انفجارات قوية ولا ترافقها مقذوفات صلبة.

تأخذ البراكين الدرعية أشكالاً دائرية مقببة حين ينظر إليها من الأعلى، حيث ترتفع جوانبها تدريجياً نحو الفوهة، ونادراً ما يتجاوز انحدارها (١٠°) درجات. ومثال ذلك البراكين الدرعية في جزيرة هاواي. فقد بنيت هذه الجزيرة من تلاحم خمسة براكين درعية (شكل ١٠-٣).




**شكل ١٠-٣: خريطة لجزيرة هاواي.**

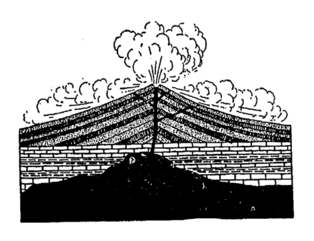
**ب - مقطع عرضي في بركاني كيلاوا ومونالوا حسب الاستقامة AA´.**

إن أكثر اللابات حداثة هي تدفقات بركاني كيلاوا Kilauea ومونالوا Mouna Loa. فقد شهد بركان كيلاوا عدة نشاطات حدثت خلال بضعة من العقود الماضية، كما اندفعت اللابات من بركان مونالوا عام ١٩٥٠ مغطية عدداً من القرى، ويقدر حجم هذه اللابات بنحو (٤٩٠) مليون متر مكعب. وبعد هدوء استمر حتى عام ١٩٧٥. عاد هذا البركان إلى النشاط وتدفق ما يقرب من (٣٠) مليون متر مكعب من اللابات. ويرتفع بركان مونالوا عن سطح البحر (٤٢٠٠)متراً. فإذا أضيف هذا الارتفاع إلى ارتفاع جزئه المغمور تحت سطح البحر فإنه يبلغ نحو (٩٠٠٠) متراً. ويشكل أعلى جبل في العالم. ويبلغ طوله

(١١٩)كيلومتراً وعرضه (٨٥) كيلومتراً عند قاعدته على قاع المحيط الهادي. أما حجمه فيقدر بنحو ٥٠,٠٠٠ كيلومترمكعب.

### ٢- البراكين المركبة

وهي براكين ذات مخاريط مؤلفة من تعاقب مواد فتاتية نارية pyroclastic وصبات من اللابا مبنية حول الفوهة الرئيسة، ويكون انحدار جوانبها نحو ٣٠° في القمة تنخفض إلى حدود خمس درجات في القاعدة. ومثال هذا النوع بركان مايون Mayon ولوزون Luzon في الفيليبين، وبركان (فولكان) في جزر ليباري شمال صقلية. ويكون لهذا النوع من البراكين نشاط مختلط من مقذوفات سائلة وصلبة



شكل ١٠-٤: رسم تخطيطي يوضح البراكين المطبقة.

وغازية. وتسبب اللزوجة العالية للابات المندفعة تصلبها أثناء تدفقها البطيء على جوانب البركان، وقد يمتد تصلب المغما إلى الفوهة ويؤدي إلى اغلاقها وعندها يهدأ البركان، وحين يعود النشاط البركاني وتحتبس المغما مع الغازات والأبخرة المتحررة منها، يزداد الضغط على السدادة إلى درجة تؤدي إلى ثوران انفجاري عنيف، يقذف بكميات هائلة من الفتات الناري، الذي يهبط ويتراكم جزء كبير منه على جوانب البركان، ولا يلبث أن يُغطى بتدفق لابي جديد، وإن تكرار هذه العملية

من الاندفاعات تُبنى المخاريط البركانية الطبقية stratovolcanoes (شكل١٠-٤).

### ٣- براكين الرماد

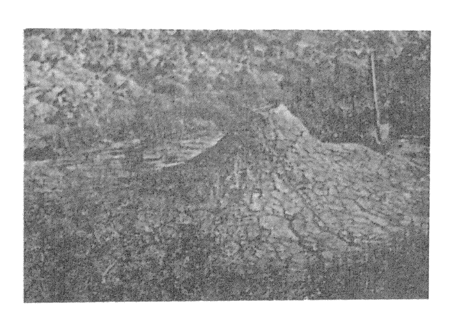
وهي ذات مخاريط مؤلفة من شظايا وفتات ناري يتراكم على جوانب الفوهة، وانحدارات جانبية تتراوح بين ٣٠°-٤٥°، ترتفع قمتها لتصل إلى ما يقرب من ٥٠٠م ومثال ذلك بركان باريكوتين Paricutin في المكسيك، وبركان سترومبولي في جزر ليباري في شمال شبه جزيرة صقلية. يتصف هذا النوع من البراكين بكون اللابا أساسية التركيب ومائعة بعض الشيء، ولكنها لا تسيل أبداً. وعندما تصل اللابا إلى فوهة البركان تحدث انفجارات كبيرة، نتيجة تحرر الغازات المضغوطة، وتلقي رماداً وقنابل تسقط حول قمع البركان لتشكل منها مخروطاً بركانياً.

### ٤- نموذج بيلي Pelean type

يقع جبل بيلي في الجزء الشمالي لجزيرة المارتينيك التابعة لجزر الهند الغربية. ويمثل تدفق لابا لزجة جداً لا تلبث أن تتصلب مشكلة سدادة تغلق فوهة البركان. ففي ١٩٠٢/٥/١ شوهدت فجأة سحابة سوداء ظهرت من قمة الجبل بعد أن انشقت شكل (٧)، وفي الثامن من الشهر نفسه حدثت انفجارات قوية مطلقة غازات وأبخرة محملة بالرماد والغبار ذات درجة حرارة تقارب (٨٠٠°)مئوية، ما لبث أن غطت مدينة سانت بيير Saint Pierre لثقلها وقتلت جميع السكان، ويقرب عددهم من ٣٠,٠٠٠ نسمة. وقد رافق انطلاق الغازات ظهور ابرة انديزيتية ارتفعت عموديا في الجو ووصلت إلى ارتفاع يقرب من ٣٠٠م، وما لبثت مع مرور الزمن أن انهارت وتفتتت و لم يبق منها عام ١٩٠٧ إلا قطعة صغيرة، وقد عادت الاندفاعات في عامي ١٩٢٩ و١٩٣٠.

وهنالك ظواهر أخرى شبيهة بالبراكين يطلق عليه بعض الجيولوجيين اسم البراكين الطينية mud volcanoes. وهي تتشكل من التدفقات الطينية التي تخرج من باطن الأرض مصحوبة بغازات كربونية أو هيدروكربونية. ويكثر وجودها في حقول البترول، ومثالها منطقة باكو على بحر قزوين في روسيا. ويعود تشكلها إلى

الغازات المنطلقة من زيت البترول التي تدفع بقوة مع المياه الجوفية مواد طينية إلى سطح الأرض يؤدي تراكمها إلى تشكل مخروط طيني (شكل ١٠-٥).

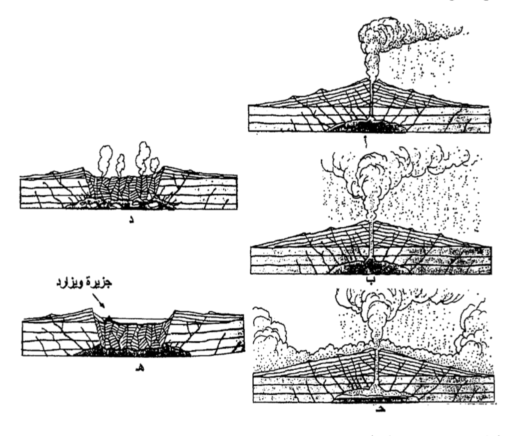


**شكل ١٠-٥: البراكين الطينية**

## الكلديرة caldera

وهي هيئة طبوغرافية تترافق مع البراكين، وتكون على شكل منخفض دائري تقريباً يتراوح قطره من (٨-١٠)كيلومترات. تشكل بنتيجة هبوط قمة بركان ضخم كان موجوداً سابقاً، لذلك يجب أن نميز الكلديرات بشكل جيد عن الفوهات البركانية التي تظهر على شكل انخفاض دائري أو قمعي في قمة المخروط. أما أسباب نشوء الكلديرة فيمكن أن تكون ناجمة من الحت بعد خمود البركان أو هبوط أرضي يسببه نشاط انفجاري. وأكثر الأسباب المؤدية لتشكلها هي انهيار قمة البركان بسبب تراكم أكداس من اللابات وفراغ الحجرة المغماتية الواقعة تحتها من محتواها، بحيث ينعدم دعمها مما يؤدي إلى هبوط البركان هبوطاً ذاتياً نحو الأسفل مؤدياً إلى تشكل الكلديرة.

إن أشهر كلديرة معروفة في العالم وتجتذب السواح بشكلها الرائع هـي كلديـرة بحيرة كريتر Crater في الأوريغون، التي يبلـغ عرضهـا (٨ـ١٠)كيلومـترات وعمقهـا (١٣٠٠)متر. وتقع في مكان بركان سمي فيما بعد بجبل مازاما Mount Mazama التي ترتفع قمته إلى نحو (٤٠٠٠)متر عن سطح البحر وقد بدأت هذه البحيرة بالتشكل منذ (٧٠٠٠) سنة خلال اندفاع شهده الهنـود سـنة (٤٠٠٠) ق.م ويقـدر الجيولوجيـون حجم اللابات التي تدفقت منه خلال عدة مراحـل مـا يقـرب مـن خمسـين إلى سبعين كيلومتراً مكعباً من المواد البركانية. ونظراً لثقل هذه الكمية وافتقارهـا إلى الدعـم مـن الأسفل فقد تداعى هذا البركان بعمليات هبوط بلغت نحو (١٥٠٠) متر، فوق حجرة مغماتية فارغة. وبعد تهدم المخروط ملأت مياه الأمطار الكلديـرة المتكونـة. وبعـد فـترة من الزمن تكـون مخـروط صغير مـن الرمـاد يسـمى جزيـرة ويـزارد Wizard Island




شكل ١٠-٦: يوضح مراحل تطور بحيرة كريتر.

أ- بداية الاندفاع البركاني

ب- الاندفاع البركاني أصبح أكثر شدة مع تساقط الفتات الناري، وخلو المدخنة البركانية من المغما.

حـ- ذروة الاندفاع البركاني وتفريغ الحجرة المغماتية.

د- انهيار قمة مخروط البركان داخل الحجرة المغماتية.

هـ- بحيرة كريتر اليوم، وتظهر جزيرة ويزارد واللابات مغطية قاع البحيرة وتصلب المغما المتبقية في الحجرة المغماتية.

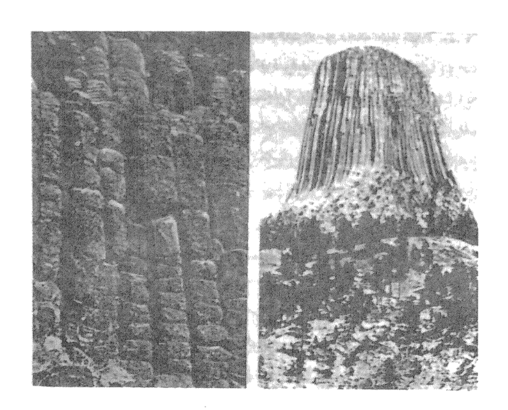
وتعد بحيرة كريتر أضخم كلديرة وجدت على سطح الأرض. إلا أن الملاحظات الكونية خارج نطاق الأرض سجلت وجود كلديرة ضخمة على بعض الكواكب. فقد سجلت المركبة الفضائية مارينر ٩ Mariner وجود كلديرة ضخمة جداً على سطح المريخ يبلغ قطرها (٦٥) كيلومتراً وتغطي مساحة تبلغ (٤٥) ضعف مساحة بحيرة كريتر.

## اندفاعات الشقوق Fissure eruptions

إن بعض الفتحات البركانية تكوّن شقوقاً طولانية في القشرة الأرضية تندفع منها اللابات وأحياناً الفتات الناري. أما اللابات التي تتدفق من هذه الفتحات فتكون عادة بازلتية تندفع إلى السطح بهدوء دون حدوث انفجارات. وبسبب سيولتها العالية فإنها تنتشر إلى أماكن بعيدة عن مخرجها، وتتجه عادة حسب انحدار الأراضي إلى الأماكن المنخفضة وتملؤها. ويؤدي تتابع فترات نشاط التدفق اللابي إلى تشكل طبقات متعاقبة من البازلت تغطي مساحات واسعة وتسمى تشكيلات البازلت الناجمة منها البازلت الفيضي flood basalt أو البازلت السطيحي plateau basalt.

إن أكبر تدفقات البازلت الفيضي حدثت في حزيران عام ١٧٩٣ في أيسلندا، التي تقع فوق مرتفع وسط المحيط، وهي التدفقات الوحيدة التي جرت على اليابسة وشهدها التاريخ مع العلم أن عمليات تدفق البازلت الفيضي من الشقوق ما زالت تجري في أعراف المحيطات. فقد أدى وقوع سلسلة من الهزات الأرضية في ايسلندا إلى انفتاح شق في القشرة الأرضية بطول (٢٥) كيلومتراً أطلق عليه اسم شق لاكي Laki fissure، أخذت تتدفق منه اللابات البازلتية في مراحل متقطعة، واستمرت حتى أوائل تشرين الثاني من العام نفسه. وقد انسابت اللابات في وادٍ نهري ملأته بكامله وفاضت من جوانبه، كما اجتاحت الروافد النهرية وعدداً من القرى المجاورة، واستمر التدفق حتى وصلت اللابات إلى الأراضي الشاطئية المنخفضة، وانتشرت فيها على مساحات واسعة وأخذت شكلاً مروحياً كبيراً. وعند توقف تدفق اللابات البازلتية وتصلب البازلت بكامله حتى فوق الشق حدثت اضطرابات

انفجارية أدت إلى انطلاق الرماد البركاني من عدد من الفتحات على امتـداد الشـق في أكثر من (١٠٠) متراً. وقد بلغت المساحات التي غمرت بالبـازلت الفيضـي نحـو (٥٦٥) كيلومتراً مربعاً. وقد شهد التاريخ الجيولوجي كثيراً مـن الأحـداث المماثلـة وكانت أضخم بكثير جداً مما حدث في ايسلندا. وعلى سبيل المثال نذكـر البـازلت الفيضي الذي غمر مسـاحات واسعة تشـمل أجـزاء مـن ولايـات كولومبيـا ونيفـادا وكاليفورنيا والأريغون وواشنطن الأمريكية. وقد حدثت عمليات تدفق هذا البـازلت منذ (١٠) ملايـين سنة، وبلغـت سماكتـه الاجمالية مـا يقـرب مـن (١٨٠٠) مـتر. ويتكشـف معظمـه في خـانق نهـر السـنيك Snake river وفي أسـفل خـانق نهـر كولومبيا. كما تظهر تكشـفات هـذا البـازلت في كاليفورنيـا الشـمالية بشـكل جيـد ونموذجي، حيث يظهر فيها كثير من هيئات البركنة مثل أنفاق اللابة lava tunnels، حيث كانت يوماً ممرات اللابا المتحركة، نجمت من تصلب السطح الخارجي وبقـاء الجزء الداخلي مملوءاً بالمواد المنصهرة الـتي تسـتمر في تقدمهـا داخـل قنـوات تاركـة وراءها فراغات على شكل أنفاق. وتبدي طبقات البازلت السميكة هيئـات أخـرى مميزة أهمها البازلت العمداني columnar basalt، النـاجم مـن عمليـات التـبرد والتقلص وحدوث فواصل تدعـى الفواصـل العمدانيـة columnar joints حيـث يؤدي تبرد اللابـات وتصلبهـا إلى تقلـص البـازلت وتشـكل شـقوق عموديـة علـى سطحها يزداد عمقها مع ازدياد التصلب، مما يؤدي إلى تشكل مضلعـات موشـورية بازلتية تشـبه الأعمـدة ويكـون لهـا (٤ـ٦) مـن الأوجـه الجانبيـة (شـكل ١٠ـ٧). ويتكشف أيضاً بازلت عمداني يأخذ شكل البرج ويطلق عليه اسم بـرج الشـياطين Devils tower ويفسر وجوده بهذا الشكل بتصلب اللابا داخـل مدخنـة بركانيـة على شكل سدادة حيث تشققت بفواصل عمدانية.



**شكل ١٠-٧: الفواصل العمدانية في البازلت وتمثل الصورة إلى اليمين برج الشياطين.**

## داخنات اليحموم Fumaroles

وهي فتحات سطحية تطلق مواد غازية فقط، يكثر وجودها في بعض مناطق النشاط البركاني. ويدخل بخار الماء في تركيبها بنسب عالية جداً تزيد على ٩٠٪ وقد تصل إلى ٩٩٪ ويليه ثنائي اوكسيد الكربون ($CO_2$). أما المواد الغازية الأخرى وهي بنسب قليلة جداً فتشمل سلفيد الهدروجين ($H_2S$) وحمض كلور الماء ($HCl$) وحمض فلور الماء ($HF$) والكبريت وثنائي اوكسيد الكبريت ($SO_2$) والأمونياك ($NH_3$) ومواد أخرى. ولا تتشابه المنطلقات الغازية (اليحموم) في نسب التركيب الإجمالي لمختلف المواد المذكورة. وهي تعود في أصلها إلى ما يتحرر من المغمات المحتبسة تحت سطح الأرض من أبخرة وغازات.

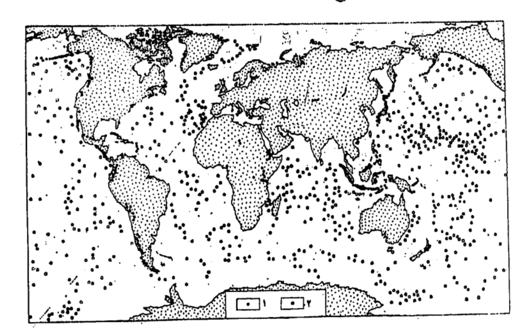
وقد تترسب حول فتحات الانطلاق تصعدات sublimates فلزية قد يتشكل

منها توضعات اقتصادية. وتتوضع هذه المواد الفلزية من الحالة الغازيـة مباشـرة دون المرور بالحالة السائلة. وكذلك تتفاعل الأبخرة والغازات مع الصخور التي تمر بتماس معها وتفسدها، وتحرر منها عنـاصر معدنيـة ولا معدنيـة وتوضـع مركباتهـا مـع مـا يتوضع على سطح الأرض.

يمكن أن تحتـوي توضعـات اليحمـوم كميـات مختلفـة مـن المعـادن المفيـدة مثـل النحاس والرصاص والزنك والمنغنيز والفضـة وأحيانـاً الذهـب، بالإضافـة إلى بعـض الكلوريدات والسلفات والفلوريدات والتيلوريدات والكـبريت الحـر. وبعـض هـذه التوضعات يمكن أن يصلح للاستثمار المنجمي.

## توزع النشاط البركاني

تقع أكثر من (٦٠٠) من الـبراكين النشـطة المعروفـة في مجـال هوامـش صفـائح الغلاف الصخري المتقاربة (شكل ١٠-٨) يضاف إلى ذلـك نشـاط بركـاني واسـع النطاق يحـدث بعيـداً عـن الأنظـار على امتـداد مراكـز التوسـع في أنظمـة أعـراف المحيطات، وفي داخل الصفائح أيضاً.




شكل ١٠-٨: توزع البراكين في العالم.
١- براكين ناشطة
٢- براكين تحت مائية ناشطة وخامدة.

## ١- بركنة مراكز التوسع Spreading centre volcanism

يتشكل القسم الأعظم من الصخور البركانية على امتداد أنظمة أعراف المحيطات، حيث ينشط توسع قاع المحيطات. فعندما يندفع جزءان من الغلاف الصخري ليتباعدا عن بعضهما بعضاً، ينخفض الضغط عن الصخور الواقعة أسفل هذا الغلاف، مما يؤدي إلى خفض نقطة الانصهار لصخور المعطف بيريدوتيتية التركيب، ويحدث فيها الانصهار الجزئي الذي يولد كميات كبيرة من المغما البازلتية، التي تتحرك نحو الأعلى لتملأ الشقوق حديثة التشكل في الغلاف الصخري (شكل ١٠-٩، ص٣٩٣).

تشكل بعض الصهارة البازلتية التي تصل إلى قاع المحيطات تدفقات لابية واسعة النطاق، أو أنها أحياناً تتكدس على شكل تراكمات لابية، يمكن أن تُشكل مخاريط بركانية قد ترتفع فوق سطح البحر مثل بركان سورتسي Surtsey. الذي انبثق من المحيط إلى القرب من جنوب ايسلندا عام ١٩٦٣. يوجد أيضاً العديد من المخاريط البركانية التي تشكلت على امتداد قمم أنظمة أعراف المحيطات، وتحركت مبتعدة مع تشكل جديد من قشرة المحيطات بفعل توسع قيعان المحيطات المستمر.

## ٢- بركنة نطاقات الانغراز Subduction zone volcanism

ينحصر وجود الصخور النارية ذات التركيب الأنديزيتي والغرانيتي في سلاسل أقواس الجزر وفي القارات. ونسبة قليلة منها موجودة كجزء من براكين أحواض المحيطات العميقة. يضاف إلى ذلك أن معظم البراكين النشطة التي تندفع منها المغما الأنديزيتية تقع في مناطق قارية، أو في أقواس الجزر الواقعة بمحاذاة خنادق المحيطات العميقة. لكون خنادق المحيطات هي مواقع انحناء صفائح قشرة المحيطات وهبوطها منغرزة في المعطف العلوي (شكل ١٠-٩). وعندما تصل صفائح المحيطات الباردة إلى أعماق تقرب من (١٢٥) كيلومتراً[1]. يحصل الانصهار الجزئي في قشرة

---

[1] يعتقد العلماء أن الانصهار الجزئي يحصل في صفائح المحيطات المنغرزة في أعماق تقرب من ١٢٥ كيلومتر.

المحيطات بازلتية التركيب، مع ما يرافقها من رسوبات مبللة معطية مغما انديزيتية التركيب، وبعد انصهار كميات كافية من المغما، تطفو تدريجياً نحو الأعلى لأنها أقل كثافة من الصخور المحيطة بها، وتتدفق على السطح على شكل لابات انديزيتية مكونة المخاريط البركانية. وهي العمليات التي أدت إلى خلق نظام الأقواس البركانية في اليابان وسلاسل جبال الأنديز في أمريكا الجنوبية.

إن حلقة النار التي تطوق المحيط الهادي مترافقة مع انغراز وانصهار صفيحة المحيط الهادي، حيث تندفع من البراكين في هذا النطاق النشط لابات ذات محتوى متوسط من السيليكا. ومثالها البراكين المؤلفة لسلسلة جبال كاسكاد Cascadeفي شمال غرب الولايات المتحدة، بما فيها جبال سانت هيلين St. Helens ورينير Rainier وشاستا Shasta.

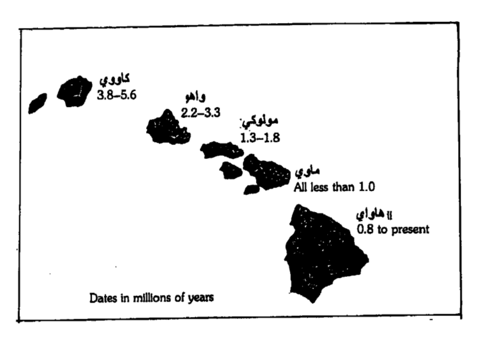
## ٣ـ البركنة داخل الصفائح Intraplate volcanism

يصعب تحديد العمليات التي تحرض النشاط البركاني داخل الصفائح الصلبة للغلاف الصخري. وقد نجم عن هذا النشاط تدفقات ذات تركيب ريوليتي من الخفان والرماد البركاني في يلوستون Yellowstone والمناطق القريبة منها في الولايات المتحدة ، وتدفقات ذات تركيب بازلتي غطت مساحات واسعة من الشمال الغربي لهذه المنطقة. بما أن اللابات البازلتية موجودة في القارات وفي الأحواض المحيطية، فإن ذلك يدعو للقول إن الانصهار الجزئي لصخور المعطف العلوي هو السبب في هذا النشاط.

وقد بينت الدراسات الزلزالية في جزر هاواي أن مصدر اللابا البازلتية هو من الانصهار الجزئي لصخور المعطف العلوي. ولكن ما هو السبب في الانصهار الجزئي لصخور المعطف العلوي تحت صفائح الغلاف الصخري؟ لقد اقترح الباحثون أن تدرج الحرارة الأرضية يؤدي إلى وجود نطاق يقع على عمق يتراوح من (١٠٠ـ٢٥٠) كيلومتراً يحتوي على بعض الصهارة. ومن هذه الجيوب المنصهرة المسماة البقع الساخنة hot spots تُقذف اللابات إلى السطح. ويفترض أن هذه النشاطات البركانية تحدث في الوقت التي تتحرك فيه الصفيحة القارية أو المحيطية

فـوق البقعـة السـاخنة، ممـا يـؤدي إلى تقببهـــا وتشـــققها وتدفـــق اللابـــا البازلتيـــة (شكل ١٠-٩).

تدل المعلومات أن معظم البقع الساخنة ثابتة تقريباً في مكانها. ويعتقد أن جـزر هاواي تكونت على التوالي في الوقت التي تتحرك فيه صفيحـة المحيـط الهـادي فـوق بقعة ساخنة (شكل ١٠-١٠). وقد أثبت ذلك مـن تحديـد الأعمـار المطلقـة للجـزر باستعمال طريقة بوتاسيوم - أرغون من (٢٧) موقعـاً بركانيـاً. وإن جزيـرة هـاواي هي أحدث الجزر، وما زال اثنان من براكينهـا مونـالوا وكيـلاوا نشـيطين إلى الآن. وقد تبين حديثاً أن تراكماً بركانياً يتكـون في قـاع المحيـط بـالقرب مـن الجـزر، ممـا يدعو للتنبؤ بأن جزيرة جديدة ستبرز وتنضم إلى سلسلة الجزر.




**شكل ١٠-١٠: يبين التناقص في عمر الجزر باتجاه جزيرة هاواي. وتشير الأرقام إلى تاريخ تشكل الجزر بملايين السنين.**

وبصورة عامة تخرج اللابا والرماد البركاني ذات التركيب الريوليتي من فوهـات تقع في اتجاه اليابسة للهوامش القارية. وهـذا يستدعي افتراض أن انصهـار القشـرة

القارية يكون من الآليات المسؤولة عن تشكل المغما الغنية بالسيليكا. ولكن ما هي الآليّة التي أدت إلى انصهار كميات كبيرة من المواد القارية؟

يقترح أحد الافتراضات أن كتلة قارية سميكة تقع أحياناً فوق صهارة صاعدة من البقع الساخنة، وبدلاً من أن تتدفق إلى السطح لتشكل اللابات البازلتية كما حدث في جزر هاواي، استقرت تحت الصفيحة القارية وأدت إلى انصهارها، وتكونت مغما غنية بالسيليكا، لا تلبث أن تصعد ببطء إلى الأعلى، وتستمد المغما الصاعدة حرارتها من النشاط المستمر للبقعة الساخنة. وقد يكون ما حدث في منطقة يلوستون ناتج عن مثل هذا النشاط.

لقد أجابت نظرية تكتونية الصفائح على عدد كبير من الأسئلة التي كانت موضوع جدل بين كثير من الجيولوجيين. لكن الآن أسئلة جديدة تطرح نفسها فمثلاً: كيف تنشأ البقع الساخنة؟ ولماذا تقع مراكز التوسع في بعض المناطق دون غيرها؟ هذا السؤالان فقط من بين عدد من الأسئلة لا يوجد لها إجابات حتى الآن.

## البراكين والحياة البشرية

لقد ساهمت النشاطات البركانية التي حدثت على سطح الأرض مساهمة فعالة ومفيدة للحياة. إذ أن الحياة الموجودة على سطح الأرض وفي الغلاف الجوي، تعود بأصلها إلى ما لفظته هذه النشاطات من أبخرة وغازات خلال أزمنة التاريخ الجيولوجي. كما أدت الاندفاعات البركانية تحت المحيطات إلى بناء الكثير من الجزر الحالية. ويبدو أنها مسؤولة أيضاً عن تشكل القارات. وما زالت في الوقت الحاضر تعمل في إضافة أجزاء جديدة إلى اليابسة. ففي عام ١٩٦٠ أضافت التدفقات من بركان كيلاوا في جزيرة هاواي مساحة جديدة من اليابسة تقدر بـ (١,٣)كيلومتراً مربعاً.

وعندما تخضع تراكمات الرماد البركاني إلى عمليات التجوية ينتج منها ترب خصبة جداً. كما يمكن أن تزدهر الحياة النباتية فوق الرماد البركاني بعد سنة واحدة من استقراره. وقد لوحظ وجود غابات كثيفة تطورت فوق سطوح لابات لم يمض على تصلبها أكثر من (١٠٠) عام. وتتجدد خصوبة بعض الأراضي إثر

توضع الرماد البركاني فوقها. فالرماد البركاني يتشرب مياه الأمطار ويحتفظ بها فترة طويلة، وتتحرر منه بسهولة مواد مهمة للحياة النباتية أهمها عنصر البوتاسيوم.

ويزيد الاهتمام في الوقت الحاضر بالمناطق البركانية من أجل الاستفادة من الطاقة الحرارية الأرضية Geothermal energy. ففي أيسلندا أُستفيد من المياه الجوفية الساخنة لتدفئة المنازل منذ عام ١٩٣٠، وحالياً يستفيد منها ما يزيد على ٦٠٪ من السكان. كما يُستفاد حالياً من الأبخرة المنطلقة من الجيزرات في توليد الطاقة الكهربائية بولاية كاليفورنيا.

وبالمقابل تؤدي النشاطات البركانية إلى أحداث تخريبية وأضرار جمة في الأرواح والممتلكات. وأكثر هذه الأحداث خطورة ما تسببه التدفقات اللابية. فالتربة الخصبة المتوفرة في المناطق البركانية تجتذب السكان المهتمين بالزراعة فتتوسع فيها المزارع والقرى لدرجة يمكن أن تمتد الزراعة إلى المنحدرات البركانية. وقد شهد التاريخ أحداثاً كارثية مروعة هاجمت فيها اللابات المتدفقة قرى كثيرة وغمرتها بسرعة، حيث حوصر سكانها وقُضي عليهم. يضاف إلى ذلك أخطار انطلاق وتراكم الرماد البركاني الذي يؤدي إلى دمار واسع النطاق. فاندفعات الرماد البركاني التي انطلقت في ايسلندا عام ١٧٨٣ على امتداد شق لاكي، ويقدر حجمها بـ (٠,٣) كيلو متراً مكعباً، وكان هذا الرماد مختلطاً مع الغاز الكبريتي السام، حيث أدى إلى كوارث فادحة في المحاصيل الزراعية، وإلى القضاء على نصف الأبقار وثلاثة أرباع الغنم والأحصنة، وإلى إبادة ما يقرب من $\frac{1}{5}$ السكان، وأعاقت نشاط الصيادين، وحدثت مجاعة استمرت لفترة من الزمن.

ونذكر أيضاً أن الرماد البركاني الناعم الذي انطلق بكميات هائلة من بركان تامبورا Tambora في أندونيسيا عام ١٨١٥ توزع في أجواء مختلف من أنحاء العالم وأدى إلى نقصان شدة أشعة الشمس التي تصل إلى سطح الأرض. نجم منها نقصان في معدلات الحرارة السنوية. ففي انكلترا هبط هذا المعدل بمعدل (١,٣°) مئوية. وازدادت فيها أحداث الصقيع وبالتالي أدت إلى تلف المحاصيل الزراعية. وكان لها تأثيرات مماثلة في الولايات المتحدة حيث تواترت حوادث الصقيع، وأصبحت

تحدث في عدد من الولايات مرة على الأقل في كل شـهر حتى في أشهر الصيف، وأدت إلى خسائر فادحة في المحـاصيل الزراعيـة. ويمكـن أن يـؤدي حـدوث نشـاط بركاني مماثل في الوقت الحاضر إلى أضرار وخسائر أكثير بكثير وبخاصـة مـع تزايد عدد السكان ونقصان الموارد الغذائية.

ويمكن لبعض الانفجـارات البركانيـة أن تقـذف في الجـو سـحابات مـن الرماد البركاني والقطع الصخرية مرتفعة الحرارة، حيث تتساقط وتتدحـرج علـى سـطوح المنحدرات وتدمر كل ما يقع في طريقها بما فيها القرى والمدن.

# الفصل الحادي عشر

# تشوه الصخور وتكوّن الجبال

## مقدمة

إن سطح الأرض مؤلف من مرتفعات ومنخفضات، تتألف المنخفضات من أراض منبسطة قد يوجد فيها بعض الأكمات كالكثبان الرملية أو تلال مؤلفة من صخور ناتئة أتت عليها عوامل الحت المختلفة. أما المرتفعات فإن تضاريسها تكون أكثر تنوعاً فمنها الجبال المنفردة والهضاب، ومنها السلاسل الجبلية البسيطة والضخمة، يضاف إليها المرتفعات التي شكلتها الحادثات البركانية.

غير أنه يكون للمرتفعات، بالرغم من أن الصخور البركانية تشترك غالباً فيها بنسبة قد تكون كبيرة أحياناً، منشأ آخر. فهي تعد حصيلة الحركات التكتونية التي أصابت القشرة الأرضية وأدت إلى تشوهها. فالطبقات الصخرية التي تشكلت في قاع البحار والمحيطات والبحيرات في مستويات أفقية، تفقد أوضاعها الأولية أثناء هذه الحركات، فتنهض أو تهبط وتتخذ أوضاعاً مائلة وتتجعد كما يتجعد الورق أو القماش، وتتكسر وقد يغطي بعضها بعضاً، حتى أنها تنقلب على بعضها أحياناً وتشكل هذه التشوهات معظم مرتفعات سطح الأرض.

إن دراسة ظواهر الحركات التكتونية من محدبات ومقعرات وكسور تعرف

**بالجيولوجيا البنيوية structural geology**. وتبين هذه الدراسة أن جميع التشوهات التي تحدث في القشرة الأرضية يمكن تصنيفها بحسب صفاتها إلى مجموعتين كبيرتين:

أ ـ التشوه بالالتواء ويحدث عادة نتيجة القوى الأفقية حيث تشكل المناطق الملتوية والسلاسل الجبلية (الطيات).

ب ـ التشوه بالتكسر ويحدث نتيجة القوى الشاقولية وتتميز بها المناطق المتصدعة.

# تشوه الصخور

من المعروف أن القشرة الأرضية هي غلاف صلب ذو حركية، ولا يمكن افتراض وجود الحركة فيها بدون وجود قوى هائلة تؤدي إلى سلوكية مرنة أو لدنة أو كسورة، وإلى تحرك المغمات داخلها وصعودها إلى السطح. لذلك لا بد لنا أن نتعرف على امكانات تشوه صخور القشرة الأرضية.

تتشوه الأجسام الصلبة بنتيجة خضوعها إلى قوى ضغط بطرائق رئيسة ثلاث وهي:

**١ـ التشوه المرن Elastic deformation**: وهو تشوه مؤقت يحدث في الجسم الصلب تحت تأثير قوى مطبقة عليه، بحيث يعود إلى شكله وحجمه الأصليين حين زوال القوة المؤثرة فيه.

**٢ـ التشوه اللدن Ductile deformation**: وهو تشوه دائم يحدث في الأجسام الصلبة حين تطبق عليها قوى تحت شروط خاصة تجعلها تسلك سلوكاً لدناً. فإذا تجاوزت القوى المطبقة حداً معيناً يسمى **حد المرونة elastic limite**، فإن الجسم

لا يكون له قدرة كافية لاستعادة شكله وحجمه السابق ولو زالت القوى المؤثرة.

٣- التشوه الكسور **Brittle deformtion**: وهو تشوه دائم أيضاً يؤدي إلى انهيار وتحطيم الجسم الصلب حين تؤدي القوى المطبقة عليه إلى تجاوز حد مرونته. ويمكن ملاحظة مختلف أنواع هذه التشوهات في الصخور المتكشفة على سطح الأرض، أو التي تُجرى عليها تجارب مخبرية.

ومن أجل التعرف على تشوه الصخور، لا بد لنا أن نعرف بعض الخصائص الأساسية للأجسام الصلبة، وأن نلاحظ سلوكية الأنواع الصخرية المختلفة في التجارب المخبرية على عينات منها بأشكال اسطوانية أو مكعبة، ونجعلها تخضع لقوى ضغط أو شد أو فتل تحت شروط محددة.

حين يخضع جسم إلى قوة ما فإنها تؤدي إلى تشوهه، تسمى هذه القوة **الجهد stress**. ويقاس الجهد عادة بوحدة ضغط على وحدة مساحة. فحين نقول إن الجهد يعادل باراً Bar واحداً يعني أنه معادل لضغط جوي واحد على سنتيمتر مربع. وإن استخدام مصطلح الجهد عوضاً عن الضغط يعني قوة موجهة تؤدي للتشوه. لأن مفهوم الضغط في الموائع يعني ضغطاً متعادلاً في جميع الاتجاهات.

وحين تخضع الأجسام الصلبة لجهد ما فإنها تتجاوب بتغيير شكلها أو حجمها أو بكليهما معاً، ويستخدم مصطلح **إجهاد strain** لوصف هذا التغيير. فحين ينضغط قضيب معدني بجهد يؤدي إلى قصر طوله بمقدار ١٠٪ يوصف بأنه قد حدث فيه إجهاد بمقدار ١٠٪. كذلك الأمر في حالة تغير الحجم أو الشكل. فالجهد مقياس للقوى المؤدية للتشوه، والإجهاد مقياس لمقدار التغيّر بالشكل أو الحجم أو الأبعاد.

## التشوه المرن

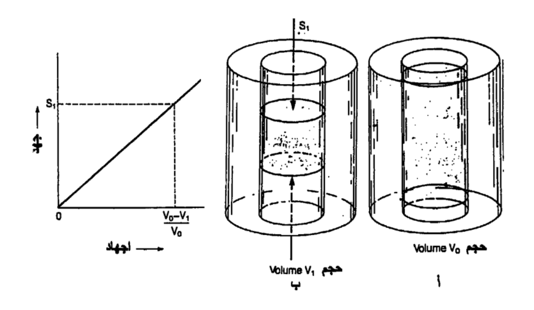
إن أول من اكتشف أن علاقة الجهد بالإجهاد هي علاقة خطية هو العالم البريطاني روبرت هوك Robert Hook. وعرفت هذه العلاقة فيما بعد بقانون هوك وهو $Q = \frac{F}{S}$.

حيث تمثل $Q$ الاجهاد.

وتمثل $F$ القوة مقدرة بالكيلوغرام.

وتمثل $S$ وحدة المساحة مقدرة بالسنتيمتر المربع.

أي أن الاجهاد يتناسب طرداً مع الجهد وذلك عندما تكون القوة المطبقة تحت حد المرونة. وقد وجد بنتيجة تجاربه العديدة أن هذا القانون ينطبق على الأجسام الصلبة بما فيها الصخور (شكل ١١-١). والنقطة المهمة التي يجب ذكرها وهي أن لجميع الأجسام الصلبة حداً للمرونة بحيث تعود إلى شكلها وحجمها الأصليين حين تزول القوى المطبقة عليها قبل تجاوز هذا الحد. لذلك لا تترك الهزات الأرضية آثاراً في الصخور إذا لم تتجاوز حدود مرونتها. فاسطوانة من الرخام يمكن أن يطبق عليها ضغط بموازاة محورها يقل عن (٧٥٠) باراً دون أن يتغير فيها شيء، ولكن عند تجاوز الضغط لهذا الحد فإنها تتشوه وتتحطم، أي أنها تتشوه تشوهاً كسوراً.

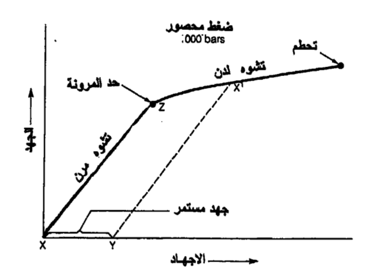



**شكل ١١-١: يوضح قانون هوك الذي يتضمن علاقة الجهد بالاجهاد.**

اسطوانة صخرية محاطة بغلاف معدني متين وقد أخضعت لجهد $S_1$ حيث نقص حجمها من $V_0$ إلى $V_1$. والرسم البياني يوضح علاقة $S_1$ (الجهد) بنقصان الحجم $(V_0 - V_1)$ (الإجهاد).

## التشوه اللدن

يمكن إعادة التجربة على اسطوانة أخرى من الرخام بعد إحاطتها بغلاف معدني متين. وبذلك نجعلها تخضع لضغط محصور موازٍ لمحورها فنحصل على نتائج مختلفة. ومع زيادة الضغط عليها بشكل تدريجي، نلاحظ أن الخط البياني للجهد والإجهاد يرتفع بشكل نظامي ضمن حدود مرونتها حتى يصل إلى النقطة Z (نقطة حد المرونة)، وذلك مبين في الشكل (١١-٢)، حيث يتحول الخط البياني المستقيم إلى منحن يميل إلى الانبساط. ويستمر ازدياد الضغط في هذه التجربة حتى النقطة Xi، ثم يزال الجهد، فنجد أن شكل إسطوانة الرخام قد تغير بين النقطتين Z و X1 دون أن تتحطم وعلى ذلك تكون النقطة Z هي نقطة **عتبة المرونة yeild point**، ويكون التشوه في اسطوانة الرخام بعد تجاوز هذه العتبة هو تشوه لدن. وحين إعادة التجربة مع استمرار تطبيق الجهد وزيادة الضغط، فإن إسطوانة الرخام سوف تصل إلى حد تتحطم فيه بشكل فجائي، وبذلك تكون قد خضعت خلال هذه التجربة إلى ثلاثة أنواع من التشوه وهي المرن ثم اللدن وأخيراً الكسور.



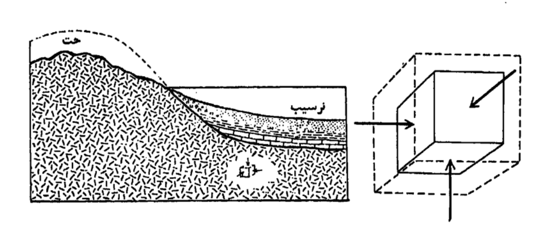

**شكل ١١-٢: رسم بياني يوضح التشوه المرن من Z إلى X1 حيث يرجع الصخر إلى شكله الأصلي حين يزال الجهد المطبق. نقطة Z تشير إلى بدء التشوه اللدن. والخط Xy معيار الاجهاد الدائم وغير القابل للعكس الناجم عن التشوه اللدن.**

لا بد في مجال دراسة تشوهات الصخور من تقويم الأهمية النسبية للتشوه اللدن المتجه نحو حدوث التشوه الكسور. فالشروط الأساسية التي تتحكم في مدى تشوه الأجسام تشوهاً لدناً قبل الوصول إلى عتبة التكسر هي: الضغط المحصور والحرارة والزمن والتركيب الصخري والمحاليل.

## أ ـ تأثير الحرارة والضغط المحصور

إن ارتفاع درجة حرارة الجسم الصلب يزيد من لدونته، وهذا يظهر في قضيب من الزجاج أو الفولاذ حين نحاول ثنيه بالدرجة العادية من الحرارة الأمر المؤدي إلى تكسره، إلا أن كلا النوعين يمكن ثنيه بسهولة عندما يسخنان إلى درجة الاحمرار مثلاً. وإن رفع درجة حرارة الصخور يساعد على حركة جزئياتها وتجعل الصخور أكثر قابلية للتشوه اللدن. ولكن ارتفاع درجة الحرارة إلى ما فوق ١٠٠٠° مئوية، تصبح الصخور لينة ويمكن أن تسيل. والتشوهات في هذه الحالة تعود إلى الانتقال من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة، وليس للتشوهات اللدنة مكان في هذا المجال.

أما أهمية الضغط المحصور أو الضغط الصخري التوازني Lithostatic pressure فهي غير معروفة تماماً في خبراتنا العادية، باستثناء بعض التجارب المخبرية. إلا أنه يمكن القول إن الضغط المحصور يميل إلى حفظ المادة قطعة واحدة مع التغيير في حجمها، وذلك لأن الضغط المطبق على الصخر متوازن في جميع الجهات كما يحدث في الضغط المائي التوازني على جسم مغمور في سائل ما. ويكون هذا الضغط مسيطر بصورة عامة على صخور القشرة الأرضية الموجودة في الأعماق. وبنتيجة هذا الضغط ينقص حجم الصخر وتزداد كثافته (شكل ١١ـ٣). وقد وجد نتيجة التجارب المخبرية أنه في حالة زيادة الضغط المحصور تزداد المقاومة الحدية وحد المرونة للصخور زيادة ملحوظة. فالصخور التي تسلك سلوك الأجسام الكسورة تحت الضغط العادي، يمكن أن تسلك سلوكاً لدناً يؤدي إلى إنحنائها وتدفقها، إذا وجدت تحت ضغط محصور مناسب. فالحرارة العالية المترافقة مع الضغوط المحصورة المطبقة على الصخور الموجودة في أعماق القشرة الأرضية أو في المعطف تجعلها تنحني وتنطوي وتتدفق.



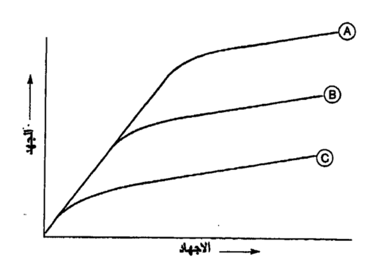

**شكل ١١-٣: يوضح التشوه الحجمي بتأثير الضغط الصخري التوازني.**

## ٢ـ تأثير الضغط المحصور والزمن

إن للزمن دوراً مهماً في تشوه الصخور، مع أننا لا يمكن أن نلاحظ تأثيره في خبراتنا العامة. فالجهد المطبق على جسم صلب ينتقل تأثيره على جميع مكوناته الذرية، وعندما يتجاوز الجهد قوى الترابط بين الذرات فإنه يزيحها من أمكنتها الأصلية إلى أمكنة أخرى داخل الشبكات البلورية لكي تواجه تأثيره، أو يؤدي إلى تحطيم هذه القوى الترابطية. إلا أن الذرات المكونة للجسم الصلب لا تتحرك بسرعة. وحين يفترض أن تزايد الجهد يحدث بشكل بطيء جداً وتدريجي خلال فترة زمنية طويلة، بحيث يتيح المجال للذرات أن تتحرك وأن يعيد الجسم الصلب توازنه بتغيير شكله أو حجمه أو بالانثناء والتدفق. ويصطلح على تسمية خصائص اللدونة الصخرية المعتمدة على الزمن **بمعدل الاجهاد** strain rate، أي المعدل الذي يكون فيه الجسم مجبراً على التشوه اللدن. وتقاس معدلات الإجهاد بمقدار تغير حجم وحدة حجميه معينة في الثانية الواحدة. ففي التجارب المخبرية يقاس معدل الإجهاد بالوحدة ١٠⁻⁶/ثا، وهذا يعني تغييراً حجمياً يقدر بواحد من مليون من وحدة حجمية بالثانية.

أما معدلات الإجهاد في باطن الأرض فهي أبطأ من ذلك بكثير، وقد تقاس $10^{-14}$/ثا أو $10^{-15}$/ثا، وكل ما قلَّ معدل الإجهاد في الصخر ازداد ميله إلى اللدونة.

والمقارنة الموجودة في الشكل (١١-٤) تشير إلى الحرارة المنخفضة ومعدل الإجهاد المرتفع يزيدان من قابلية الأجسام الصلبة للتكسر. وهذه الخصائص موجودة في صخور القشرة الأرضية السطحية لذلك يكون التشوه الكسور شائعاً فيها. وبالمقابل حين تكون الحرارة عالية والجهد عالياً ومعدل الاجهاد منخفضاً فإنها تزيد من قابلية التشوه اللدن، وهذه خصائص مميزة لصخور الأعماق في القشرة الأرضية والمعطف.




**شكل ١١-٤: منحنيات بيانية نموذجية لصخور قاسية تقع تحت ضغط محصور وتختلف عن بعضها بعضاً بدرجة الحرارة ومعدل الاجهاد. المنحني A - حرارة منخفضة ومعدل إجهاد عالي**
**B - حرارة عالية ومعدل إجهاد عالي**
**C - حرارة عالية مع معدل إجهاد منخفض.**

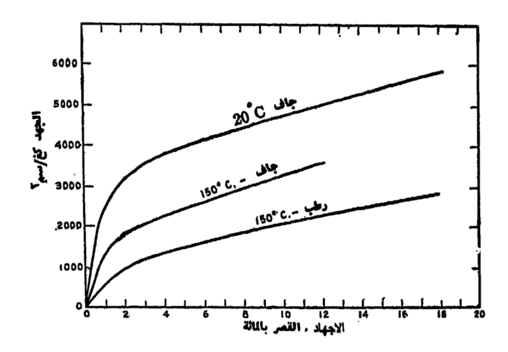
## ٣- تأثير التركيب الصخري

يؤثر التركيب الصخري بشكل كبير في لدونته وبخاصة نسبة الرطوبة فيه وتركيبه الفلزي. فالغشاوات المائية التي تملأ الفراغات الدقيقة بين حبيباته الفلزية تضعف من تماسك هذه الحبيبات بعضها مع بعض. لذلك يميل الصخر الرطب إلى اللدونة أكثر

من الصخر الجاف. كما أن ضعف متانة الفلزات المكونة له يزيد من لدونته والعكس صحيح. ومن الفلزات الضعيفة التي يساعد وجودها على التشوه نذكر الملح الصخري والكربونات مثل الكالسيت والدولوميت، وفلزات السيليكات الصفائحية مثل الغضاريات والكلوريت والميكا والسربنتين والتالك. أما الفلزات المتينة التي تُضعف التشوه اللدن للصخر وتزيد من ميله للتكسر نذكر منها فلزات النيوسيليكات مثل الأوليفين والغرينا وفلزات التكتوسيليكات مثل الكوارتز والفلدسبار، أما فلزات الإينوسيليكات مثل البيروكسين والأمفيبول فتعطي الصخور الحاوية عليها خصائص تشوه تقع بين خصائص صخور الكوارتز وصخور الميكا. ولهذا فإن الصخور الكلسية والرخام والغضار الصفحي والاردواز والفيلليت والشيست تتجاوب بسهولة بالتشوه اللدن، وإن صخور الكوارتزيت والغرانيت والغرانوديوريت والغنايس تتجاوب بالتشوه الكسور. وحين يتعرض تعاقب صخري مؤلف من صخور تميل إلى اللدونة وأخرى تميل إلى الكسورة إلى جهود عالية فإن اختلاف تجاوبها يظهر واضحاً للعيان على تكشفاتها. فالصخور القاسية تتكسر إلى كتل متطاولة تدعى بودين Bouidins تُملأ فيما بينها تدفقات الصخور اللدنة معطية ما يسمى بوديناج Boudinage (شكل١١- ٥، ص٣٩٤).

## ٤- تأثير المحاليل والحرارة

تلعب الفراغات والمحاليل الموجودة في الفراغات البينية للحبات المؤلفة للصخور دوراً هاماً في التغيرات التي تطرأ عليها. حيث تقوم المحاليل بالتفاعل مع المكونات الأولية للصخر بعد أن تذيبها وتشكل فلزات جديدة، وهذا ما يحدث غالباً في الصخور العميقة حيث تتعرض لضغوط عالية وحرارة مرتفعة. وكذلك تقوم المحاليل بدور زيت التشحيم فتسهل الانزلاق وتنقص الجهد اللازم لاحداثه كما هو واضح في الشكل (١١-٦).

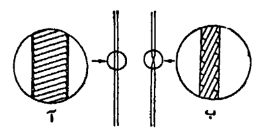



شكل ١١-٦: رسم بياني يوضح تأثير درجة الحرارة والمحاليل في تشوه الرخام.

## حدوث التشوه اللدن

من النادر جداً ملاحظة حدوث التشوهات اللدنة في الصخور، فهي دائماً تحدث ببطء شديد وعلى أعماق كبيرة. إلا أن الصخور المشوهة تحوي دلائل كثيرة على حدوث حركات واسعة النطاق داخل الليتوسفير. فالتشوهات الواسعة النطاق ما هي إلا مجموع تشوهات محلية صغيرة جداً لا يمكن إحصاؤها، وهذه التشوهات الصغيرة يمكن أن تلاحظ وتدرس بشكل تفصيلي في المختبر، كما أن التجارب المخبرية مفتاح لفهم التشوهات الكبيرة الموجودة في السلاسل الجبلية. وفي هذا المجال لا بد أن نذكر بعض الدراسات المخبرية التي تمت على مواد معدنية وفلزات لا معدنية مثل الكالسيت والصفاح وكذلك التشوه اللدن للملح الصخري والصخور الكثيفة.

**التشوه اللدن في المعادن:** إذا أخذنا قضيباً من النحاس أو الألمنيوم وشددناه من طرفيه، لاحظنا أنه أصبح رفيعاً في نقطة ما ثم لا يلبث أن ينقطع بزيادة طفيفة للشد (شكل ١١-٦).



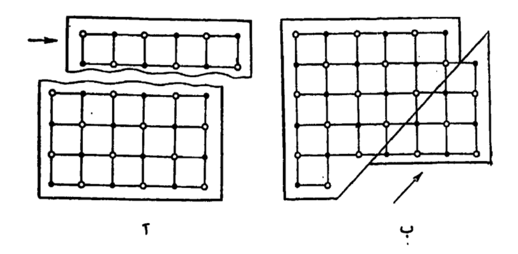

**شكل ١١- ٦ (مكرر): تأثير قوى الشد على سلك من الألمنيوم**
**أ- قبل الشد. ب - بعد الشد.**

يمكن تمثيل ما يحدث في نقطة الانقطاع، إن عملية ترفيع السلك تتم بتقسيم السلك إلى عدد من الأقراص المستوية، تحدد سماكتها ووضعها بالخواص البلورية للمعدن المدروس. ومع استمرار الشد ينزلق كل قرص على الذي يليه، فيغيّر من وضعيته دون أن يضيع الاتصال معه. وتتحدد صفات هذه العملية بخواص الشبكة البلورية المرتبطة بالترتيب الذري للمادة المدروسة.

**التشوه اللدن في الملح الصخري:** يتبلور الهاليت NaCl في النظام المكعبي، حيث تتوضع ايونات الكلور والصوديوم بالتناوب على رؤوس المكعب متجاوبة في ذلك مع الشحنات الكهربائية السالبة والموجبة. ويحدد التأثير المتبادل في هذه الشحنات تركيب البلورة وخواصها. فإذا حاولنا أن نجعل بعض الجزئيات من البلورة تحل محل الأخرى في المستوى نفسه وبصورة موازية لاحد الصفوف، كما يتوضح في الرسم المبين الشكل (١١-٧)، فمن السهل معرفة اللحظة التي تتوضع فيها أيونات الصوديوم والكلور جنباً إلى جنب مع مثيلاتها. وبتأثير القوى الدافعة، والناتجة عن التماثل في

الشحنة الكهربائية، فإن جزئيات البلورة تبتعد الواحدة عن الأخرى، وتنزلق البلورة على طول مستوى مواز لأحد الأوجه البلورية (على طول سطح الانفصام).

ويتغير ذلك كله إذا ما حاولنا احلال جزء من البلورة محل جزء آخر باتجاه مواز للقطر أو عمودياً عليه. وهنا لا يظهر وجود قوى متنافرة بل يبقى الاتصال قائماً بين الجزئيات بالرغم من أن شكل البلورة الخارجي يتغير (شكل ١١-٧).




**شكل ١١-٧: التشوه في بلورة ملح صخري**
**آ - انزلاق ب - تشوه لدن.**

هنالك أنماط أخرى من التشوه اللدن معروفة أيضاً، وقد دُرس بعضها بشكل جيد، مثل عملية الفتل الميكانيكي Mechanical twinning التي تتمثل بشكل رئيس بدوران بعض الكتل من الشبكة البلورية بالنسبة لبعضها بعضاً، حيث تبقى الروابط بينها كما كانت عليه. وبهذا الشكل تتشوه بلورات الكالسيت وكذلك بلورات توائم الصفاح وبخاصة المكروكلين والالبيت.

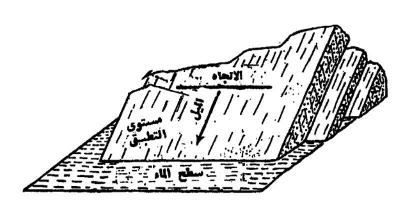
**التشوه اللدن في الصخور الكثيفة:** يلاحظ أن الصخور الكثيفة المؤلفة من تجمع فلزات متباينة، تتشوه من خلال تحركات الحبيبات المكونة للصخر، إذ ان هنالك

تشققات عديدة تنزلق عليها الحبيبات بالنسبة لبعضها بعضاً، وتبقى كل حبة من حبات الصخر محتفظة بذاتها واستقلالها رغم تحركها، ويحدث الالتحام بين الحبات مرة أخرى نتيجة الضغط المحصور الواقع على الصخر. ولهذا لا يظهر أثر للتمزقات التي حدثت عليها هذه الانزلاقات. ويبدو أن وجود غشاء رقيق من الماء مغلفاً كل حبة يساعد على التحرك.

## التشوه بالإلتواء وتشكل الطيات

يؤدي التشوه اللدن إلى التواء الصخور وتجعدها ويظهر ذلك بوضوح في الصخور الرسوبية لكونها مؤلفة من طبقات متتابعة، وتعد من الصخور اللينة بالنسبة إلى الصخور البلورية. ويمكن أن نلاحظ فيها مختلف أنواع الإلتواءات.

تظهر الإلتواءات بوضوح على امتداد السلاسل الجبلية، وبغض النظر عن حجم الصخر وتشوهه فإن التواء الصخور إجمالاً يعرف **بالطي** fold. وتحدد وضعية الطبقات المؤلفة له بعنصرين هما الميل والاتجاه. **فالاتجاه strike** هو اتجاه أي خط أفقي يقع على سطح التطبق **Bedding plane**، ويتشكل من تقاطع مستوي الطبقة مع مستوٍ أفقي. ويحدد اتجاه الطبقة بالزاوية التي تحصل بين خط أفقي في مستوى الطبقة مع خط الطول المار في المنطقة المعينة ويقاس بوساطة البوصلة. أما **الميل Dip** فيمثل انحدار الطبقة بالنسبة إلى مستوٍ أفقي، ويقاس بالزاوية التي تحصل بين الخط الأكثر انحداراً للطبقة مع المستوي الأفقي، أي الزاوية المحصورة بين مستوي الطبقة والمستوي الأفقي (شكل ١١-٨). إن لهذه القياسات أهمية كبيرة في وضع الخرائط الجيولوجية. وتمثل على الخريطة بوساطة خط صغير يمثل الاتجاه مزوداً بسهم عمودي عليه يبين انحدار الطبقة . ويكون طول السهم متناسباً عكسياً مع شدة انحدار الطبقة.

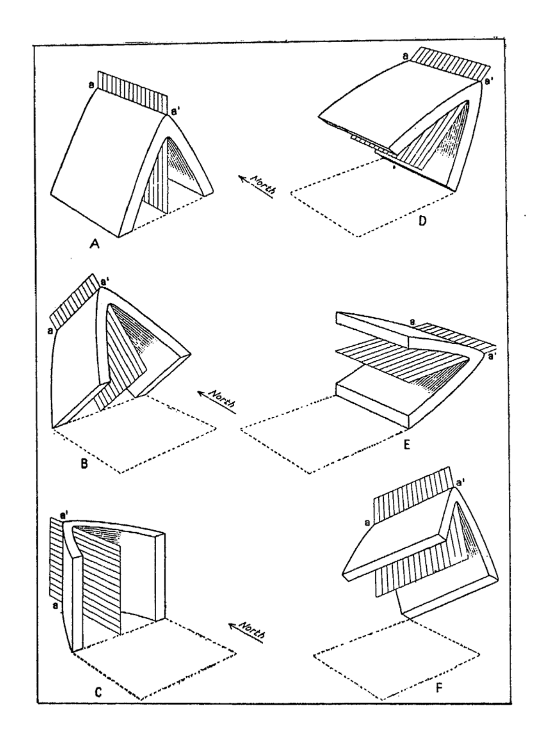



شكل ١١-٨: رسم تخطيطي يوضح الميل والاتجاه.

## أجزاء الطية Parts of fold

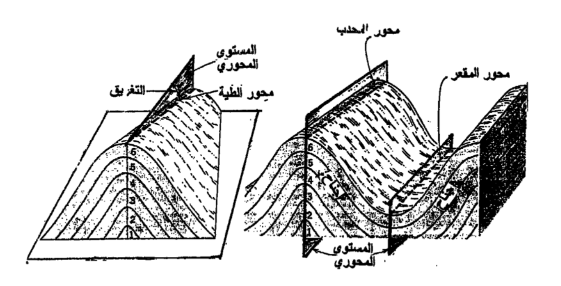
أ - **المستوى المحوري Axial plane**: وهو مستوٍ وهمي يقسم الطية إلى قسمين متناظرين وقد يكون شاقولياً أو مائلاً أو أفقياً (شكل ١١-٩).

ب - **محور الطية Fold axis**: وهو خط وهمي ينتج من تقاطع المستوى المحوري مع مستوى أفقي ويحدد اتجاه الطية. وتتميز الطية ذات المحور المائل عن المستوى الأفقي باصطلاح **الطية الغارقة** plunging fold، كما تسمى زاوية ميل هذا المحور عن المستوى الأفقي **بالتغريق** plunge.




شكل ١١ـ٩: المستوى المحوري ووضعياته المختلفة. ويمثل الخط a a' محور الطية

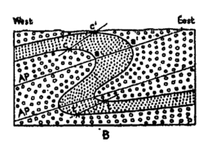
**حـ ـ جناحا الطيـة Fold limbs:** وهمـا جانبـا الطيـة اللـذان يمتـدان مـن المسـتوي المحوري للطية إلى المستوي المحوري للطية الثانية (شكل ١١-١٠).




**شكل ١١-١٠: يوضح عناصر الطية**

**د ـ خط الذروة Crestal line:** وهو خـط وهمـي يمـر مـن نقـاط ذرى التحـدب. وبتعبير أدق هو الخط الذي يصل بين أعلى نقاط موجـودة علـى سـطح أي تطبـق في المحدب. أما **مسـتوى الـذروة crestal plane** فهـو المسـتوي الـذي يحـوي خطـوط الذرى.

**هـ ـ خط الغور Trough line:** وهو خط وهمـي يمتـد علـى طـول أخفـض أجـزاء الطية، وبتعبير أدق هو الخط الذي يصل بين أخفض نقـاط موجـودة علـى سـطح أي تطبق في المقعر. **ومستوي الغور trough plane** هو المسـتوي الـذي يحـوي خطـوط الغور (شكل ١١-١١).

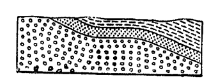


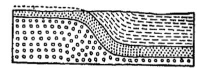

شكل ١١-١١: يوضح خط الذروة (c c') وخط الغور (t t') ومحور الطية (a a').

## التصنيف الهندسي أو الوصفي للطيات

يعتمد هذا التصنيف على وصف هندسي للطيات حسب ما تظهر في مقطع عمودي على اتجاه المستوي المحوري، كما يعتمد على وضعية جناحي الطية ومستواها المحوري.

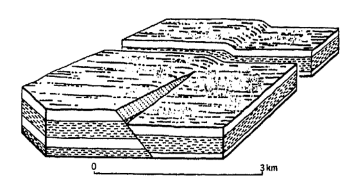
**١- الطية أحادية الميل Monoclinal fold**: وهي من أبسط أنواع الطيات، وهي التواءات وحيدة الجانب تكون فيها الطبقات الصخرية أفقية في جانب ومائلة في الجانب الآخر (شكل ١١-١٢). ومن أجل تصور الطية أحادية الميل يمكن أن نضع كتاباً على طاولة وتغطية جانبه بقطعة قماش مطبقة تمتد على الطاولة، وبذلك تأخذ قطعة القماش شكل الطية أحادية الميل.





شكل ١١-١٢: يوضح الطي أحادي الميل.

غالباً ما يكون تحت هذا النوع من الطي فالق وذلك في حالة وجود طبقات كسوره تحت الصخور الرسوبية (شكل ١١-١٣).




**شكل ١١-١٣: طية أحادية الميل فوق فالق مفصلي.**

**٢- الطية المحدبة Anticline fold والطيـة المقعرة Syncline fold**: إن معظم الطيات يكون أكثر تعقيداً من الطيات أحادية الميل، إذ تؤدي الجهود المطبقة على الصخور إلى طيها نحو الأعلى مشكلة الطي المحدب أو طيها نحو الأسفل مشكلة الطي المقعر. حيث تنحدر الطبقات في الطي المحدب باتجاه معاكس بدءاً من القمة. وتكون طبقات جناحي الطية أحدث من الطبقات التي في مركزها، بينما تكون طبقات جناحي الطية المقعرة أقدم من الطبقات التي في مركزها (شكل ١١-١٤).

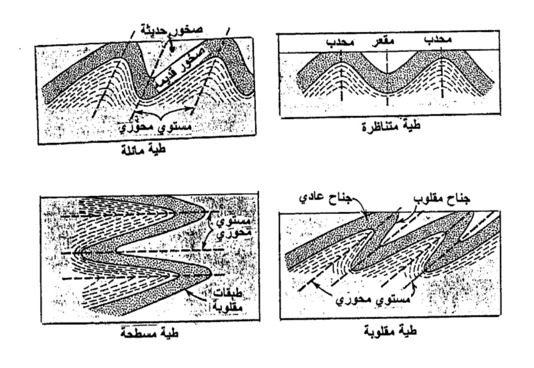
**٣- الطية المستقيمة أو المتناظرة Symmetrical fold**: وهي الطية التي يكون فيها المستوى المحوري شاقولياً ويميل جناحاها في اتجاهين متضادين بمقدار متساوٍ.

**٤- طية مائلة أو غير متناظرة Asymmetrical fold**: يكون المستوى المحوري مائلاً ويميل الجناحان بزاويتين واتجاهين مختلفين.

**٥- الطي المسطح أو النائم Recumbent fold**: يكون المستوى المحوري أفقياً.

ويحصل هذا النوع من الطي عندما توجد التواءات متراصة كما هو الحال في الطي الألبي، حيث تترقق فيها بعض الطبقات من جراء الجهود المطبقة، ولهذا تكون طبقات الجانب المسطح أقل سماكة من طبقات الجانب الآخر. يتميز هذا النوع من الطيات بأن نواتها مكونة من صخور بلورية تعود للحقب الأول ومغطاة بصخور تعود للحقب الثاني. وعندما يمتد الطي المسطح لمسافات كبيرة يطلق عليها اسم **طيات التغطية**.

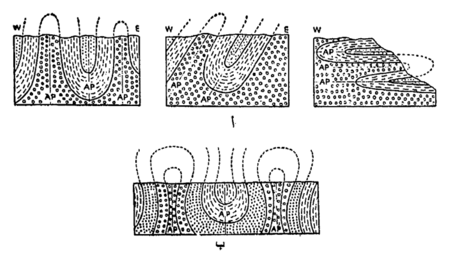
**٦ـ الطية المقلوبة Overturned fold**: يكون المستوى المحوري فيها مائلاً وينحدر جناحا الطية في جهة واحدة، لذلك يكون الجناح السفلي موجوداً بوضع مقلوب (أي أنه دار بزاوية أكثر من ٩٠°).




شكل ١١ ـ١٤: يوضح أشكال الطيات.

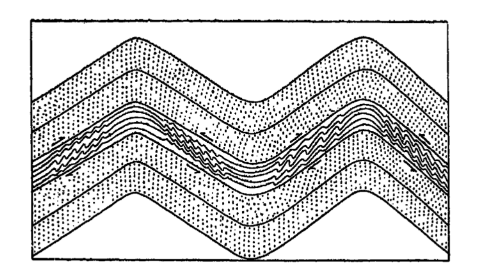
٧- **الطية متساوية الميل Isoclinal fold**: يكون جناحا الطية في هذا النوع متوازيين ويميلان باتجاه واحد، وقد يكون المستوي المحوري شاقولياً أو مائلاً أو أفقياً (شكل ١١-١٤).

٨- **الطية المروحية Fan fold**: يكون جناحا الطية مقلوبين حيث يميل الجناحان في اتجاه بعضهما بعضاً في الطية المروحية المحدبة، وعلى العكس في الطية المروحية المقعرة (شكل ١١-١٥).




**شكل ١١-١٥: يوضح أشكال الطيات متساوية الميل والمروحية.**
أ - طيات متساوية الميل. ب - طيات مروحية

**طيات السحب Drag folds**: يتشكل هذا النمط من الطيات عندما تكون الطبقات المتعاقبة غير متجانسة، مثل تتابع طبقات كلسية مع طبقات غضارية. فتحت تأثير قوى دفع تماسية تتشكل طيات غير متجانسة، نتيجة انفصال وانزلاق الطبقات بعضها فوق بعض. فكل طية من الطبقات الكلسية تقابلها طيات متعددة من الغضار. وتلاحظ هذه الحالة بكثرة في سلاسل جبال الألب (شكل ١١ -١٦).



**شكل ١١ـ ١٦: رسم تخطيطي يوضح التجاوب غير المتجانس للقوى، وتشكل طيات السحب.**

قد يصعب أحياناً وللوهلة الأولى تحديد النماذج المختلفة للطيات من الملاحظة الحقلية لتكشف الطبقات، وبخاصة الطيات التي أتت عليها عمليات الحت السطحي، لذلك يلجأ الجيولوجيون عادة إلى دراسة وضعية الطبقات وتعاقبها لتمييز الطي المحدب والطي المقعر. وتساعد في بعض الأحيان ملاحظة تشققات الطين وظاهرة التطبق المتدرج والجحور المستحاثة لبعض الديدان البحرية على تحديد وضعية الطبقات ومعرفة فيما إذا كانت الطية مقلوبة أم غير مقلوبة. وعندما يكون الطي ممتداً على نطاق واسع يصعب على الجيولوجي حين يفحص تكشفاً واحداً، أن يقرر فيما إذا كانت الطبقات الصخرية مطوية أم لا. ولكن حين يُوقع مختلف التكشفات الصخرية في منطقة دراسته على الخريطة الطبوغرافية بشكل دقيق يمكنه تمييز الطيات بشكل واضح. وتساعد أحياناً ظواهر الحت المتباين للطبقات المتجاورة المميزة بأشكال طبوغرافية خاصة على تمييز الطيات وتحديدها (شكل ١١ـ٥).

إن الانحناءات الحقيقية للقشرة الأرضية باتجاه الأعلى أو الأسفل ما هي إلا طيات بمقياس كبير جداً. وتظهر معالم هذه الطيات في المناطق الجافة التي تخلو أراضيها من الغطاء الترابي وتقطع صخورها أودية حتية للأنهار والمجاري المائية. وغالباً ما يكون الغطاء الترابي وكثافة الحياة النباتية عائقاً في سبيل تمييز هذه البنيات حتى لو وجدت بعض التكشفات الصخرية. وفي جميع الأحوال يمكن للمسح الجيولوجي الدقيق أن يُميّز البنيات الإلتوائية الحقيقية في القشرة الأرضية حتى ولو كانت زوايا ميل الطبقات بمقدار درجة واحدة أو درجتين.

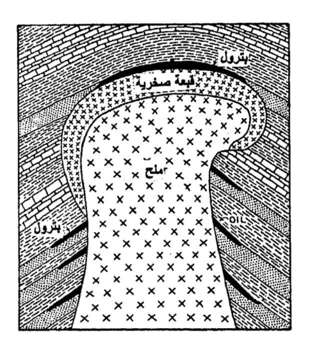
## تكتونية القباب الملحية Saline-dome tectonics

تعطي تكتونية الصخور الملحية مثالاً حسناً لتكتونية الكتل اللدنة المعقدة. فعندما توجد طبقات مؤلفة من صخور ملحية في مناطق معرضة لقوى الإلتواءات، فإن هذه الطبقات تسلك سلوك الأجسام اللدنة، فتندفع الصخور الملحية عبر نقاط الضعف في الغطاء الرسوبي، ويؤدي ذلك إلى تصدع الصخور التي تمر خلالها ودفع الطبقات التي تغطيها، وقد تثقبها وتشكل طيات خاصة بها تعرف بطيات الثقب، كما هو الحال في القباب الملحية الموجودة في منطقة غولف كوست Gulf Coast في الولايات المتحدة.

وقد يكون صعود الملح من تلقاء نفسه دون تأثير الحركات التكتونية، كما هو الحال في القباب الموجودة في منطقة شمال بحر قزوين في روسيا. حيث يصعد الملح تحت تأثير ثقل الطبقات المتوضعة فوقه، خلال المناطق الأقل مقاومة، على شكل أعمدة ترفع الطبقات التي تغطيها تدريجياً. ويستمر صعود الملح كما لو كان مؤلفاً من مادة لدنة للغاية، ليحتل في القشرة الأرضية موضعاً يتناسب مع كثافته المنخفضة. وقد يأتي الحت السطحي على الغطاء الرسوبي وتنكشف طبقات الملح، أو يثقب الملح الطبقات المغطية ويتكشف على سطح الأرض. وهذا ما يفسر تشكل جبال الملح في جنوب الجزائر.

تأخذ القباب الملحية شكلاً اسطوانياً ذا قطر صغير بالنسبة إلى ارتفاعها. وتكون مؤلفة بمعظمها من الملح الصخري مع بعض الانهيدريت. وغالباً تعلو قمتها قبعة

صخرية مؤلفة من الجص والانهيدريت وصخور جرفتها من الأعماق، لا علاقة لها بصخور السطح. كما أن طي الصخور وتصدعها بنتيجة صعود الملح يخلق بنيات ملائمة لتجمع البترول والغاز الطبيعي، لذلك تأخذ القباب الملحية أهمية كبيرة في التنقيب عن هذه المواد المفيدة (شكل ١١-١٧).




**شكل ١١-١٧: يوضح القبة الملحية والمصائد البترولية المرافقة لها.**

# التشوه بالتكسر وتشكل الفواصل والفوالق

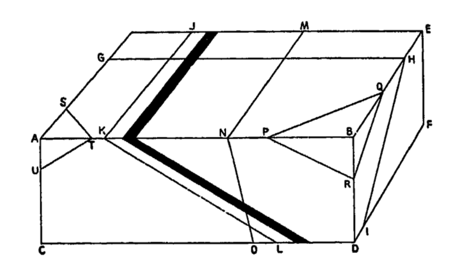
## الفواصل

حينما نتفحص مقلعاً أو تكشفاً صخرياً شاطئياً، نجد فيه بالاضافة لسطوح التطبق تكسرات تقطع الصخور في اتجاهات تقترب من الشاقولية حين تكون الطبقات أفقية، تدعى الفواصل Joints. وتحصل الفواصل بصورة عامة وفق مجموعات مؤلفة من نوعين من الفواصل المتوازية. فإذا كانت الطبقات مائلة فإن أحد النوعين يقترب اتجاهه من موازاة اتجاه الميل، بينما يكون الآخر موازياً للاتجاه. ووجود مثل هذه الفواصل يساعد كثيراً عمال المقالع على مهمتهم الرئيسة بالحصول على كتل صخرية يقترب شكلها من مواشير قائمة الزوايا، وبخاصة حين يكون هنالك فواصل رئيسة.

توصف الفواصل بأنها مستويات كسور أو شقوقاً تتكون في الصخور الصلبة دون حدوث أي حركة أو انزلاق للكتل المنفصلة على سطوح التكسر. وقد تكون هذه السطوح في أغلب الحالات مستوية، كما يمكن أن تكون منحنية. تظهر الفواصل عادة في الصخور السطحية أو القريبة من السطح وتحدد بالاتجاه والميل فيقال إنها: فواصل اتجاه strike joints عندما تكون ذات اتجاه مواز لاتجاه الطبقات، وفواصل تطبق bedding joints عندما تكون ذات اتجاه مواز لمستويات تطبق الصخور، وتعرف بفواصل ميل dip joints عندما تكون ذات اتجاه مواز لاتجاه ميل الطبقات، أما الفواصل المنحرفة أو القطرية diagonal joints فتكون ذات اتجاه ينحرف عن اتجاه وميل الطبقات (شكل ١١-١٨).

يتروح امتداد الفواصل واتساعها من شقوق مجهرية إلى كسور ذات امتداد واتساع واضح. كما تتراوح المسافة بين الفاصل والآخر من بضعة سنتمترات إلى بضعة أمتار.

تكون الفواصل بأنواعها سهلة التعرض لعوامل التجوية. فهي تتوسع بفعل



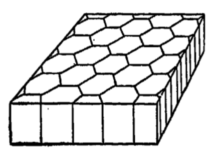

شكل ١١-١٨: يوضح الأشكال المختلفة للفواصل. يمثل الخط الأسود العريض ميل الطبقة. CHI ،ABCD فواصل ميل. BDEF ،MNO فواصل اتجاه. JKL فاصل تطبق. PQR ، STU فواصل منحرفة.

مياه الأمطار والتجلد والرياح وجذور النباتات، ونتيجة لتوسع هذه الفواصل تتشكل هيئات تشبه الجروف. وكذلك تهاجم الأمواج، على امتداد الشاطئ، الفواصل وتؤدي إلى تشكل تجاويف وكهوف. ويمكن أن يتحكم نمط الفواصل في مجرى الأنهار، وكثيراً ما تشكل سطوح الفواصل جدران الخوانق Gorges والكانيونات شديدة الانحدار. ويبدو أن معظم الفواصل تنتج من قوى شد أو إنضغاط.

### فواصل الشد Tension joints

تتشكل بنتيجة تأثير مباشر لقوى الشد. وقد يتولد فعل الشد عن فعل قوى ضاغطة، كما يحدث في السطوح العليا والسفلى للطبقات المحدبة والمقعرة للإلتواءات التي تشكلها. وقد يتولد فعل الشد عن فعل قوى ازدواجية، ومثال ذلك الشد الذي ينتج من الحركة النسبية لجداري فالق في اتجاهين متعاكسين على مستوى سطح الفالق، مما يؤدي إلى تكوين فواصل شد في صخور سطح الفالق. وقد يتولد فعل الشد من تبرد وتصلب اللابات البركانية فتؤدي إلى تشكل فواصل عمدانية

columnar joints، تظهر بوضوح في صخـور البـازلت علـى هيئـة أعمـدة شـاقولية طويلة ذات مقطع غالباً ما يكون سداسياً (شكل ١٠-٧ والشكل ١١-١٩).



شكل ١١-١٩: مجسم تخطيطي يوضح الفواصل العمدانية.

## فواصل الإنضغاط Compression joints

تتكون هذه الفواصل بنتيجة فعل مباشر لقـوى ضاغطـة أو ازدواجيـة متعاكسـة. وقد يصعب تمييز شقوق الشد أو الإنضغـاط في العمـل الحقلـي، إلا أن هنـالك بعـض القرائن التي تساعد على تحديد كل نوع منها. ففواصل الشد تكون مفتوحـة وبالتـالي تمتلئ برواسب ثانوية لاحقة. وهكذا عندما نجد رواسب ثانوية على هيئة عروق رقيقة ممتدة في اتجاهات منتظمة ومتساوية فإننا نقول إنها فواصل شد. أما فواصل الإنضغاط فهي غير مفتوحة في بداية تشكلها ولكن عوامل التجويـة قـد تـؤدي إلى توسـعها ثـم ملئها برواسب ثانوية. وفي هذه الحالة يصعب تمييزها عن فواصل الشد. وهناك قرائـن أخرى نستطيع التمييز بها لا مجال لذكرها الآن.

# الفوالق

تؤدي الحركات الأرضية المفاجئة إلى حدوث تصدعات الكتل الصخرية وتحركها على امتدادها. ويدعى الصدع الذي تنزاح فيه الكتلتان الموجودتان على جانبيه عن بعضهما بعضاً **بالفالق** fault حيث يتراكم الجهد المطبق على الصخور شيئاً فشيئاً ويحدث التشوه اللدن، وحين يتجاوز عتبة اللدونة يحدث التصدع والتحرك، حتى توقف قوة الاحتكاك استمراره، ثم يبدأ تراكم الجهد من جديد حتى يتجاوز قوة الاحتكاك ويؤدي إلى التحرك من جديد على امتداد الشق الصخري. ويمكن أن تعيد هذه الحلقة نفسها عدة مرات، وقد يصل استمرار التحرك على امتداد فالق كبير إلى مسافات قد تبلغ بضع كيلومترات حيث تمثل عدداً من الحركات المفاجئة، وكل حركة مفاجئة ينجم منها زلزال أرضي قد يكون مدمراً حين ينجم من تحرك قريب من السطح. وأحياناً تحدث الحركة الفالقية على امتداد عدد من سطوح الانكسارات المتجاورة فتكوّن ما يسمى نطاق الفالق fault zone. وقد تحدث الحركة الفالقية فجأة وعلى فترة واحدة أو فترات متكررة، أو قد تحدث ببطء خلال فترة طويلة من الزمن. وإن حدوث التصدعات والفوالق يشكل أماكن ضعف داخل القشرة الأرضية، تتيح المجال للموائع النارية الصاعدة عبر صخور القشرة (المغمات والمحاليل الهيدروترمالية) بأن تتحرك وتندس داخل الصخور أو تندفع إلى سطح الأرض.

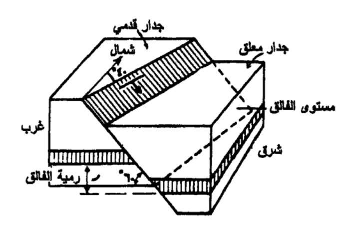
## عناصر الفالق

**أ ـ مستوى الفالق Fault plane:** يعرف أيضاً بسطح الفالق fault surface، وهو سطح الكسر الذي يحدث عليه انزلاق الكتل الصخرية على بعضها بعضاً. وقد يكون عمودياً أو مائلاً أو ملتوياً.

**ب ـ جدار الفالق Fault wall:** وهو الجانب السفلي أو العلوي للفالق. ويطلق عليه الجدار المعلق hanging wall أو العلوي الذي يقع فوق سطح الفالق المائل، والجدار

القدمي foot wall أو السفلي الذي يقع مباشرة تحت سطح الفالق المائل. أما في حالة الفالق الشاقولي فيكون جداراً يمينياً وجداراً يسارياً بالنسبة لاتجاه الفالق.

حـ ـ **رمية الفالق throw of fault**: وهي المسافة التي تفصل بين القسمين المتصدعين. وتقاس عادة بالمسافة الشاقولية بين جداري الفالق (شكل ١١ـ٢٠).

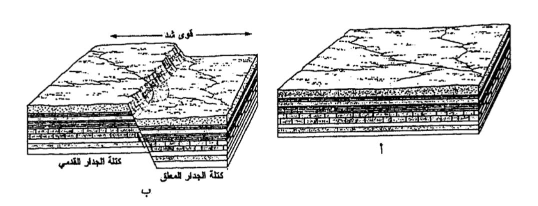



**شكل ١١ـ٢٠: رسم هندسي يبين عناصر محددة لفالق عادي باتجاه شمال ٤٠° شرق، ويميل بزاوية ٦٠° إلى الجنوب الشرقي، وبرمية ر.**

## تصنيف الفوالق:

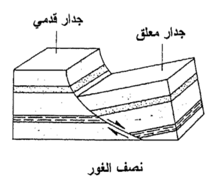
يمكن تصنيف الفوالق حسب وضعية الطبقات المتصدعة واتجاهها بالنسبة إلى مستوى الفالق، ونوع القوة المسببة لها، واتجاه الحركة النسبية للكتل الصخرية، وأخيراً حسب مظاهرها في الطبيعة من حيث وجودها مفردة أي بسيطة أو مركبة.

**١ـ الفوالق العادية normal faults**: يتميز هذا النوع من الفوالق بأن الجدار السفلي أو القدمي يقع في مستوى أعلى بالنسبة إلى الجدار المعلق. وتسببها قوى شد تباعد بين أجزاء من القشرة الأرضية لذا فهي تدل على التمدد الأرضي (شكل ١١ـ٢١).

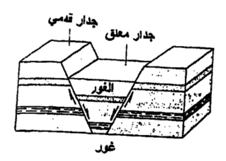


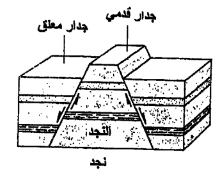

**شكل ١١-٢١: مجسم تخطيطي يوضح تشكل الفالق العادي**
**أ - وضعية الطبقات قبل حدوث الفالق**
**ب - يوضح الفالق العادي والمظهر الطبوغرافي الناتج منه، وتشير الأسهم إلى إتجاه القوى المؤثرة، وأنصاف الأسهم إلى الحركة النسبية لجداري الفالق (الكتل المتحركة).**

يوجد في القشرة الأرضية مناطق كثيرة تعرضت لمراحل متكررة من التشوه الفالقي العادي. وعادة تحاط الأجزاء الناهضة أو الهابطة منها بفالقين عاديين أو أكثر. ويدعى الجزء الهابط بالغور graben كما يدعى الجزء الناهض بالنجد horst وأحياناً يدعى الجزء الهابط المجاور لفالق واحد بنصف الغور (شكل ١١-٢٢).




**نصف الغور**

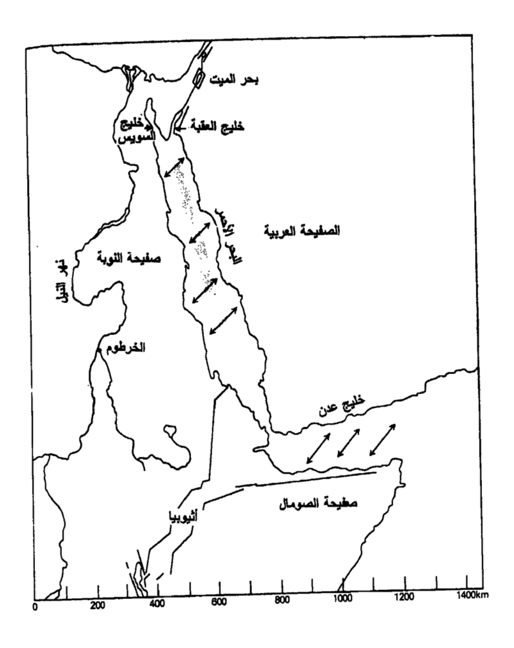



**شكل ١١-٢٢ رسم يوضح تشكل النجد والغور ونصف الغور. وتشير أنصاف السهم إلى الحركة النسبية للكتل المتحركة.**

يعد نظام الغور الأفريقي أكثر الأمثلة شهرة في العالم ويدعى أحياناً الوادي الإنهدامي الأفريقي African Rift Valley، وهو يمثل سلسلة من النجود والأغوار ويمتد من بحيرة تانغانيكا Tanganyika في أفريقيا باتجاه الشمال مسافة ٦٠٠٠كم (شكل ١١-٢٣). وتوجد على امتداده أجزاء كثيرة ذات نشاطات بركانية أدت إلى تسرب المغمات واندلاع اللابات البركانية.

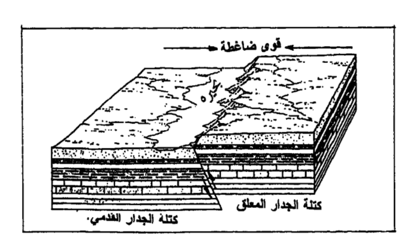
ونذكر هنا أمثلة أخرى وهي غور وادي ريو غراند Rio Grand في ولاية نيومكسيكو، والوادي النهري لنهر الراين Rhine river في أوربا الغربية الذي يمثل مجموعة من الأغوار، وأيضاً بحيرة البيكال Baikal في أسيا الوسطى وهي أعمق بحيرة في العالم وتملأ مياهها العذبة غوراً عميقاً جداً.




**شكل ١١-٢٣: رسم توضيحي للوادي الانهدامي الأفريقي الذي تشكل بنتيجة تباعد الصفيحة العربية والصفيحة الأفريقية، وأدت إلى انفتاح البحر الأحمر وخليج عدن حسب ما تبينه الأسهم.**

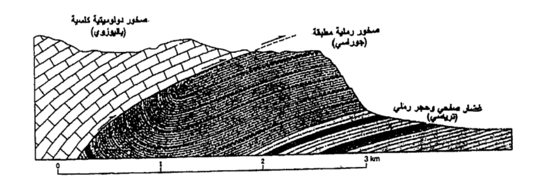
**٢- الفوالق العكسية Reverse faults**: ينشأ هذا النوع من الفوالق من جهود ضاغطة بحيث تكون الحركة الظاهرية للجدار المعلق إلى الأعلى بالنسبة إلى الجدار

القدمي، في عكس اتجاه ميل سطح الفالق (شكل ١١-٢٤) وترتبط الفوالق العكسية بحركات التقلص الأرضي لذلك تعرف بفوالق الانضغاط compression faults.



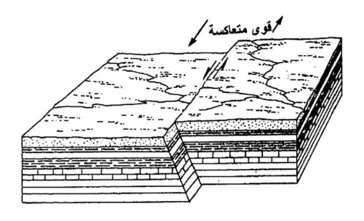

**شكل ١١-٢٤: مجسم تخطيطي يوضح الفالق العكسي والمظهر الطبوغرافي الناتج منه وقد تشكلت فيه بحيرة. وتشير الأسهم إلى اتجاه القوى الضاغطة، وأنصاف الأسهم إلى الحركة النسبية لجداري الفوالق.**

تؤدي الجهود الضاغطة في هذا النوع من الفوالق إلى تحميل صخور أقدم فوق صخور أحدث، بحيث تقصر أجزاء من القشرة الأرضية وتزيد من سماكتها. وتدعى الفوالق الضخمة من هذا النوع بفوالق الدثر أو التحميل thrust faults، وعادة تكون لمستوياتها الفالقية زوايا ميل أقل من (٤٥) درجة، وهي شائعة الوجود في السلاسل الجبلية الكبرى مثل جبال الألب. وتتميز هذه الفوالق بتحرك كتل صخرية هائلة مسافات تبلغ أحياناً بضعة كيلومترات فوق الجدار القدمي. وتكون عادة الكتل الصخرية للجدار المعلق ذات سماكات كبيرة تصل إلى ألوف الأمتار، وقد تظهر طبقات الصخور فيها شبه موازية للصخور الأحدث الواقعة تحتها لتظهر كأنها تتابع طبقي عادي (شكل ١١-٢٥).




شكل ١١-٢٥: مقطع في فالق تحميل يُظهر تراكب صخور دولوميتية كلسية (باليوزوي) فوق تشكيلات رملية مطبقة (جوراسي) وغضار صفحي وحجر رملي (ترياسي). وتشير أنصاف الأسهم إلى حركة الجدار المعلق إلى الأعلى.

**٣- فوالق الاتجاه الانزلاقية Strike - slip faults**: وهي فوالق شديدة الميل أو شاقولية تتباعد فيها الكتل الصخرية على جانبي الفالق بحركة انزلاقية أفقية (شكل١١-٢٦).




شكل ١١-٢٦: مجسم تخطيطي يوضح فالق الاتجاه الانزلاقي. ويوضح أيضاً حركة الكتل الانزلاقية الأفقية.

يعد فالق سان اندرياس San Andreas من أشهر فوالق الانزلاق الأفقي ويتميز بتحرك جانبي يميني (أي أن الفالق نفسه يتحرك نحو اليمين). ويوصف أنه فالق اتجاه انزلاق ذو تحرك جانبي يميني right lateral strike-slip fault. ويُعتقد أن الحركات النشطة مستمرة فيه منذ أزمنة الكريتاسي حتى الآن أي منذ نحو (٦٥) مليون سنة. أما مقدار التحرك الاجمالي فهو غير معروف تماماً، إلا أن بعض الدلائل تشير إلى نحو (٦٠٠) كيلومتر (شكل ٩-١٤).

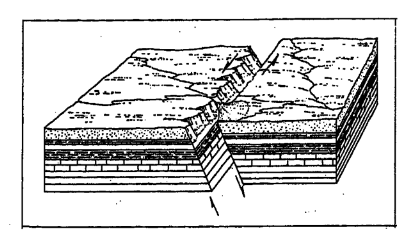
ففي عام ١٩٠٦ حدث تحرك أرضي مفاجئ على امتداد هذا الفالق وأدى إلى ازاحة أفقية لبعض الطرقات وأعمدة السياجات مسافة مقدارها (٧) أمتار. وكانت هذه الازاحة مرافقة لزلزال سان فرانسيسكو. وأيضاً حدث في عام ١٩٤٠ زلزال آخر مع تحرك أفقي على امتداد الفالق نفسه في وادي امبريال الواقع على بعد (٨٠٠) كيلومتراً جنوب شرق سان فرنسيسكو وبلغ مقدار الازاحة قرابة (٥,٥) متراً، تحركت فيها صفوف من أشجار الفاكهة وتحطمت السياجات.

يبدو أن التحرك الأفقي للكتل الصخرية على جانبي هذا الفالق هو سلوك مميز له. ويعود ذلك إلى أن فالق سان اندرياس فالق حدودي بين صفيحتين من صفائح الليتوسفير تتحركان معاً على امتداده بحيث تسبق الواحدة الأخرى وتنزلق بالنسبة إليها. والحركات الزلزالية المفاجئة تعبير عن التشوه الذي تسببه جهود مطبقة على الصفيحتين تقع على أعماق مئات من الكيلومترات.

ومن الجدير بالذكر أن تحرك الكتل الصخرية على امتداد هذا الفالق لا يكون دائماً مفاجئاً أو مترافقاً مع زلزال قوي. فقد دلت الدراسات الدقيقة التي اجريت على امتداد فالق سان اندرياس على وجود أماكن يحدث فيها انزلاق تدريجي وثابت بين الصفيحتين المتحركتين يصل معدله إلى (٥) سنتيمترات في السنة. ويبدو من ذلك أن هنالك حالات يستمر فيها الإنزلاق قرب السطح مع استمرار التشوه اللدن في الأعماق.

**٤- فوالق الإنزلاق المائل Oblique slip faults:** وهي الفوالق التي تكون فيها حركة الكتل الصخرية تشمل حركة شاقولية وحركة أفقية. أي ناجمة من تضافر

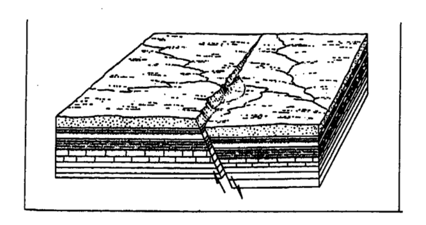
القوى التي تسبب فوالق الاتجاه الإنزلاقية والفوالق العادية (شكل ١١-٢٨).



**شكل ١١-٢٨: فالق الإنزلاق المائل.**

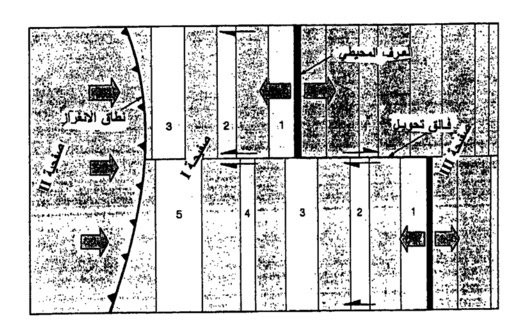
**يوضح الرسم الازاحة الشاقولية بين الطبقات المتماثلة لجداري الفالق، وأن الجدار السفلي يقع في مستوى أعلى بالنسبة إلى الجدار المعلق. كما يوضح أيضاً الإزاحة الأفقية بين الجدارين والمظاهر الطبوغرافية الناجمة من تشكل الفالق.**

**٥- فوالق مفصلية Hing faults:** يتميز هذا النوع من الفوالق أن الحركة الفالقية تكون منحنية أو دورانية وتتلاشى في نقطة معينة على امتداد اتجاه الطبقات كما هو واضح في الشكل (١١-٢٩)، وتسبب هذه الحركة قوى شد شاقولية تباعد بين الكتلتين الصخريتين.



**شكل ١١-٢٩: فالق مفصلي تشير أنصاف الأسهم إلى الحركة النسبية لجداري الفالق.**

٦- **فوالق التحويل Transform faults**: وهي نوع خاص من فوالق الاتجاه الانزلاقية شائع الانتشار في قشرة المحيطات. وتعترض هذه الفوالق أعراف المحيطات وتقطعها عرضانياً (شكل ١١-٣٠). وقد اصطلح على تسميتها فوالق التحويل لأنها تشمل تحولاً فجائياً يفصل بين هيئات أرضية متباينة.




**شكل ١١-٣٠ : رسم مبسط يوضح فالق تحويل يقطع عرضانياً العرف المحيطي. حيث تتحرك القشرة على جانبي جزئي العرف المحيطي جانبياً مبتعدة بعضها عن بعض، بينما تتحرك القشرة بين جزئي العرف على امتداد جانبي الفالق في اتجاهين متعاكسين، ويمثل الخط المسنن نطاق انغراز القشرة المحيطية تحت القشرة القارية. تشير الأسهم إلى حركة القشرة المحيطية. وتشير أنصاف الأسهم إلى الحركة النسبية للكتل المتحركة على جانبي الفالق.**

توجد ثلاث هيئات بنيوية رئيسة تحدد معالم تشوهات القشرة الأرضية وهي: خنادق المحيطات وأعرافها وفوالق التحويل. وهي هيئات متصل بعضها مع بعض وتشكل شبكة تحيط بالأرض (شكل ١١-٣١). لقد كان العالم الكندي ويلسون Wilson أول من لاحظ هذه العلاقة الشبكية بين أنواع هذه الفوالق الرئيسة. أما الحركات التي تحدث على امتداد فوالق التحويل التي تقطع أعراف المحيطات فهي

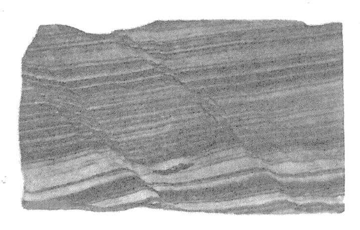
حركات إنزلاقية أفقية تسببها إضافة صخور جديدة إلى القشرة الأرضية على امتداد أعراف المحيطات، وبذلك تجعل أجزاء من القشرة الأرضية تتحرك بعيداً عن أعـراف المحيطات، وبالوقت نفسه يجري استهلاكها تدريجياً على امتداد الفوالق العكسـية في خنادق المحيطات.




**شكل ١١-٣١: منظر لقاع محيط الأطلسي بمعالمه المتباينة الأشكال (إذا ما فرغت مياهه). ويوضح علاقة مرتفعات العرف المحيطي والخندق المحيطي بفوالق التحويل.**

## دلائل الحركات الفالقية

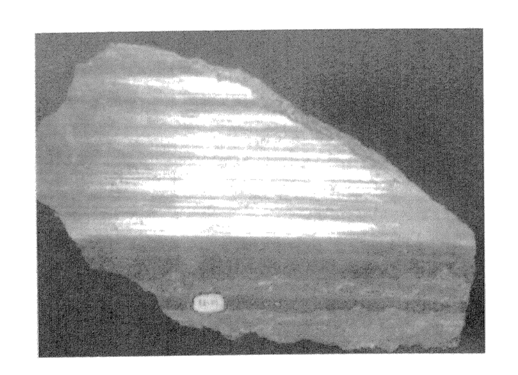
عندما نلاحظ تشققات في كتلة صخرية فإنه يصعب للوهلة الأولى أن نقرر فيما إذا كان على امتدادها ظواهر تحرك. ففي صخر ناري حبيبي متجانس المظهر كالغرانيت، أو في صخور رسوبية ناعمة التطبق، لا يمكننا أن نميز آثار التحرك أو الإزاحة. إلا أن إمعان النظر في سطوح التشققات أو في سطوح جدران الفوالق تظهر آثار الحركة كما يمكن أن تظهر اتجاه الحركة. ففي جدار بعض الفوالق يمكن تمييز التواءات أو طي لبعض الطبقات بنتيجة الشد والاحتكاك أثناء التحرك الفالقي، وتعرف هذه البنيات الالتوائية **بالسحب الفالقي** fault drag (شكل ١١-٣٢).





**شكل ١١-٣٢: سحب فالقي مجاور لفالق صغير يقطع الحجر الرملي. ويلاحظ في طبقات إحدى جداري الفالق. وتشير أنصاف الأسهم إلى الحركة النسبية لجداري الفالق.**

يضاف إلى ذلك أن احتكاك الكتل الصخرية المتحركة بتماس بعضها مع بعض يؤدي إلى صقل السطوح الانزلاقية وإلى تحززها طولانياً على امتداد التحرك وتدعى **السطوح المصقولة** Slikensides وتفيد ملاحظة الجوانب المصقولة والمحززة في تحديد اتجاهات الحركة، أو على الأقل اتجاه آخر حركة (شكل ١١-٣٣).



**شكل ١١-٣٣: سطح مصقول ومحزز ناجم من فالق، وقد تطورت فوق سطح بازلتي.**

إن السطوح الفالقية لا تكون دائماً مصقولة أو محززة، فقد يظهر فيها وعلى امتدادها كتل صخرية تجمعية ذات مظهر حصوي بريشي، تكون حصاها على الغالب من نوع صخري واحد تدعى **البريش الفالقي** fault breccia (شكل١١-٣٤). وفي بعض الأحيان يلاحظ وجود صخور مسحوقة سحقاً ناعماً على امتداد مستوى الفالق، وقد تصل فيها عمليات السحق لدرجة يصعب تمييزها حتى تحت المجهر.



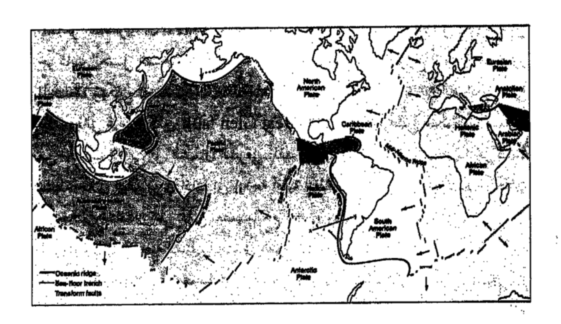
شكل ١١-٣٤: بريش فالقي تظهر فيه قطع زاويّة من الغنايس تجمعها مواد صخرية مسحوقة.

## دلائل على حدوث التشوهات القديمة

توجد إلى جانب ملاحظة حدوث تشوهات مفاجئة أو بطيئة في الوقت الحالي دلائل تشير إلى حدوث الكثير من التشوهات في الأزمنة القديمة. ولقد ساهمت الدراسات الطبوغرافية الغزيرة التي أجريت فوق اليابسة أو تحت سطح البحر في توفير الكثير من الدلائل على حدوث التشوهات في القشرة الأرضية منذ القديم. وقد لوحظ في بعض مناطق العالم، من خلال دراسة توزع الأنواع الصخرية المختلفة، وجود شواهد تشير إلى حدوث تحركات أفقية يصل مداها إلى مئات الكيلومترات، وحدوث تحركات شاقولية واسعة المدى وسوف نأتي على دراسة بعض الأمثلة ونبدأ بالمظاهر الطبوغرافية.

**المظاهر الطبوغرافية Topographic features**: لقد لوحظ في كثير من أنحاء العالم وجود مصاطب شاطئية متدرجة ترتفع فوق مستوى البحر وتحوي جروفاً ناجمة من تصادم البحر مع اليابسة. فمثلاً يوجد على امتداد الشاطئ الجنوبي لولاية

كاليفورنيا والجزر المجاورة مصاطب بحرية متدرجة يصل ارتفاع أعلاها إلى قرابة (٤٥٠) متر فوق مستوى سطح البحر. وهذا يشير إلى أن جزءاً من شاطئ هذه الولاية تعرض إلى عمليات نهوض متتالية تفصل بينها فترات هدوء كانت كافية لتشكل مصاطب هذه الجروف الشاطئية. وقد لوحظ أيضاً أن ارتفاع هذه المصاطب يتغير من موقع لآخر، مما يشير إلى أن نهوضاً غير نظامي سببته الضغوط المتولدة بين الصفيحتين المتحركتين (صفيحة كاليفورنيا وصفيحة المحيط الهادي) أو أن الحد الفالقي بينهما يمر بالقرب من هذه الشواطئ (شكل ١١ـ٣٥).

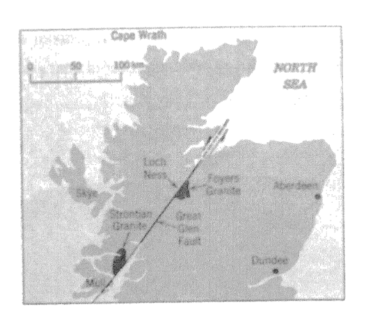



**شكل ١١ـ٣٥: رسم يوضح صفائح الغلاف الصخري الستة، وعدداً من الصفائح الصغيرة.**

ونذكر هنا مثالاً آخر على دلائل طبوغرافية تشير إلى حدوث هبوط واسع

النطاق في اليابسة، وهو في قاع البحر القريب من جزر الوتيان Aleutian islands. حيث لوحظ وجود جبال شاهقة ومرتفعات وهضاب تحت البحر خلّفت فيها المجاري المائية أودية تفصل فيما بينها، وهي بمجملها تمثل نظام جريان مائي متطور بشكل جيد. وهذا يدل على أن جزءاً من اليابسة قد غمرته مياه البحر بنتيجة هبوط تدريجي، أو أن مستوى البحر قد ارتفع وغمر جزءاً من هذه اليابسة. ومن المعروف أن مستوى سطح البحر قد ارتفع عقب انتهاء العصر الجليدي بمعدل (١٠٠) متر تقريباً. إلا أن التضاريس تحت البحرية الموجودة قرب هذه الجزر تقع على أعماق قد تزيد على (٤٠٠) متر وهذا يرجح افتراض هبوط اليابسة بشكل تدريجي.

**المظاهر الصخرية Bedrock features**: يمكن العثور على دلائل وفيرة على تحركات الكتل الصخرية الضخمة من خلال دراسات توزع أنواع الصخور المختلفة، ويكفي أن نذكر هنا مثالاً واحداً لاثبات ذلك. وهو توزع الصخور على امتداد فالق غريت كلين Great Glen fault الذي يقطع أراضي سكوتلندا متجهاً من الجنوب الغربي إلى الشمال الشرقي. لقد كان هذا الفالق مصحوباً بحركات نشطة خلال الباليوزوي أدت إلى إزاحة أفقية لنطاقات استحالية، ووضع سحنتين استحالتين مختلفتين على تماس بعضهما مع بعض، وهما سحنة البيوتيت إلى الجنوب التي تتحول إلى سحنة السيليمانيت في الشمال. كما أزاح جزئي كتلة ضخمة من صخور الغرانيت بعضهما عن بعض مسافة تبلغ (١٠٠) كيلو متر (شكل١١-٣٦). وهذه المظاهر ما هي إلا دلائل قوية على حدوث الازاحات الأفقية واسعة النطاق.




**شكل ١١-٣٦: يوضح فالق غريت كلين في سكوتلندا يكسر كتلة الغرانيت إلى كتلتين، وإن الحركة الأفقية على طول الفالق أدت إلى ازاحتهما عن بعضهما البعض مسافة تقرب من ١٠٠كم.**

## علاقة الطيات بالفوالق:

يمكن للطيات والفوالق أن ينسب بعضهما إلى بعض وفق أوجه متنوعة. وكما رأينا في الشكل (١١-٣٢) امكان التواء الطبقات قرب الفوالق الكبيرة بتأثير قوى الشد والاحتكاك وتشكل طيات السحب الفالقي. كما يمكن للفوالق شديدة الميل أن تمر في أعلاها أو في أسفلها داخل طية وتزول معالمهما. ويعد الفالق المفصلي مثالاً على تحول الفالق إلى طية أحادية الميل (شكل ١١-١٣). ويمكن أن تتشكل فوالق الدثر أو التحميل في الطبقات التي تتعرض إلى طي شديد وتشكل طيات منقلبة. وكثيراً ما تتحطم الطيات بنتيجة الانضغاط الشديد قرب مستواها المحوري (شكل ١١-٢٥). وهنا لا بد أن نذكر أن عمليات الطي لا تصيب الطبقات الصخرية فحسب بل إنها تصيب فوالق التحميل أو الدثر بحد ذاتها. وفي مثل هذه الحالات يكون تفسيرها موضوعاً صعب الحل.

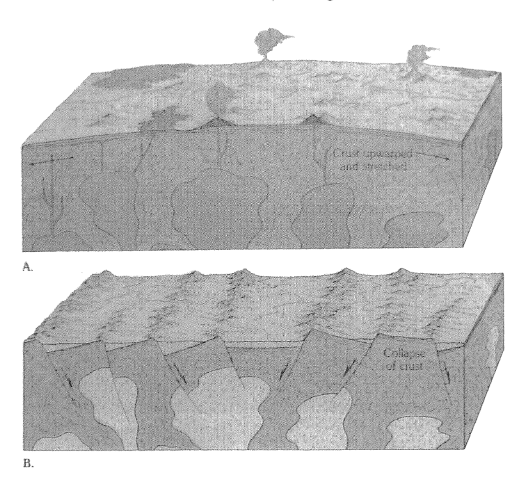
# تكوّن الجبال

يدعى تطور ونهوض أجزاء قارية من القشرة الأرضية على شكل سلاسل جبلية ضخمة مثل جبال الهيمالايا والألب والأبالاش والأورال والأنديز، تكوّن الجبال orogenesis أو بناء الجبال mountain building. وتبقى السلاسل الجبلية القديمة، التي أتى عليها الحت ومهّدها إلى أراض سهلية محتفظة بسجل تطورها، المتمثل بظواهر التشوه الشديد والاستحالة والاندساس الناري والنشاط البركاني.

تحتوي القارات على نوعين من الوحدات البنيوية، أولهما كتلة من الصخور القديمة، تعود لأزمنة ما قبل الكمبري، تتألف من صخور استحالية ونارية مترافقة أحياناً مع صخور رسوبية، وهي تعد النواة الأولية للقارات وتعرف **بالدروع القارية** continental shields وقد لوحظ احتواء الدروع القارية على بنيات اللابات الوسائدية pillow lavas التي تترافق مع رسوبات صوانية كيميائية المنشأ، مما يشير إلى أن هذه الصخور الأولية للقارات قد تشكلت من اندفاعات بركانية تحت البحر.

أما النوع الثاني فيتألف من تشكيلات رسوبية ونارية وبركانية تؤلف بمعظمها كتلاً جبلية ناهضة تحيط بالدروع القارية، حيث تزداد حداثة بالابتعاد عنها نحو البحر. وتختلف هذه الجبال بعضها عن بعض في المنشأ والشكل والحجم والطبيعة

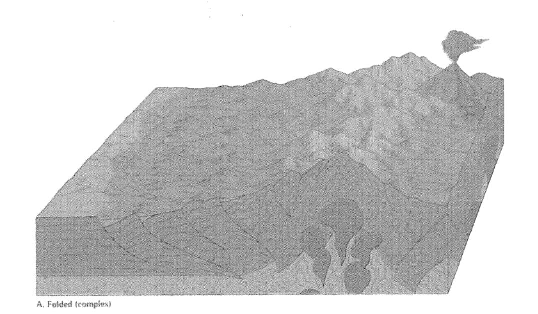
الصخرية، ويصعب تصنيفها. ويمكن الاعتماد على هيئاتها الافرادية المرتبطة بأسباب النشوء أن تصنف في مجموعات ثلاث هي الجبال البركانية volcanic mountains وجبال الكتل الفالقية أو الجبال الصدعية fault block mountains وجبال الطي fold mountains (شكل ١١-٣٧).




**شكل ١١-٣٧: يوضح الجبال البركانية أ، والجبال الصدعية ب.**

تنشأ **الجبال البركانية** من تكدس اللابات والحمم البركانية فوق سطح الأرض، وتنشأ **جبال الكتل الفالقية** من نهوض كتل من القشرة الأرضية بنتيجة

تكسرها بفوالق عادية. أما جبال الطي فهي أكثر الجبال أهمية وانتشاراً. وبالرغم من أن الطي هو المظهر المميز، إلا أن التصدع والاستحالة والنشاط البركاني متضافرة معه وبدرجات متفاوتة في بناء هذه الجبال وتنشأ **جبال الطي** من انضغاط ونهوض أحزمة طولانية من القشرة الأرضية مكسرة بفوالق عكسية (شكل ١١-٣٨)، وهي تتميز باحتوائها على هيئات ومظاهر بنيوية توحي بأنها قد مرت بمراحل تاريخية متماثلة، وتدعى عادة الأنظمة الجبلية mountain systems.




**شكل ١١-٣٨: جبال طي معقدة.**

## هيئات الأنظمة الجبلية

تشمل الأنظمة الجبلية أضخم السلاسل الجبلية وأكثرها تعقيداً منها السلاسل الجبلية الحديثة التي تمتد على طول الطرف الغربي للأمريكيتين وسلسلة جبال الألب - هيمالايا التي تمتد من البحر المتوسط إلى إيران ثم شمال الهند والهند الصينية

Indochina، وكذلك جبال غربي المحيط الهادي التي تشمل أقواس جزر ناضجة مثل اليابان والفليبين وسومطرة. وقد تشكلت هذه الجبال خلال فترة المائة مليون سنة الماضية ما عدا جبال هيمالايا التي ابتدأ تشكلها في مدى زمني أقرب لا يزيد على (٤٠) مليون سنة مضت. ونذكر بالاضافة إلى هذه السلاسل الجبلية الحديثة سلاسل جبلية قديمة تشكلت منذ الكامبري وما قبل الكامبري وهي جبال الآبالاش في الولايات المتحدة وجبال الأورال في روسيا.

تختلف الأنظمة الجبلية عن بعضها البعض بأبعادها واتساعها وتفاصيلها البنيوية والصخرية، ولكنها تتشابه في صفات ومظاهر أساسية يمكن تلخيصها بما يلي:

١ـ تأخذ أشكالاً خطية طولانية أو قوسية، وتتألف من عدد من السلاسل الجبلية المتوازية.

٢ـ تحوي أحزمة من الصخور الرسوبية المشوهة مترافقة مع صخور بركانية ونارية واستحالية، تُقطّعُها فوالق عكسية، تبدي بمجملها مظاهر انضغاط القشرة الأرضية.

٣ـ لها هندسة داخلية بالغة التعقيد. تتضمن انتقالاً لكتل هائلة من الصخور المختلفة في طبيعتها ومنشئها (منها صخور قارية وصخور قشرة المحيطات) وتعرضها للتشوه الشديد والاستحالة خلال فترة زمنية أقل بكثير من أزمنة تشكل صخورها الرسوبية.

٤ـ تأخذ الصخور الاستحالية فيها أشكال أحزمة متوازية وغير متناظرة، تعكس أنماطاً حرارية متدرجة على إمتداد هذه الأنظمة.

لقد كانت أنظمة الجبال وما زالت موضع كثير من الدراسات التي تتضمن أحياناً الكثير من الجدل والغموض. ولم تتمكن الدراسات الماضية من التوصل لأكثر من تفسير المعطيات المتعلقة بأجزائها السطحية. وقد ساهمت الدراسات الحديثة، بالاعتماد على وسائل التقانة الحديثة، التي شملت دراسات توزع الزلازل وطبيعة قيعان المحيطات في توفير معطيات مهمة عن مواطن تطور الأنظمة الجبلية، ووضع المفاهيم الأساسية حول نشوئها.

## نظريات حول تطور الأنظمة الجبلية

لقد استحوذ تطور أنظمة الجبال وتكونها اهتمام العلماء وكانت موضع كثير من الدراسات التي تضمنت نظريات عديدة أهمها:

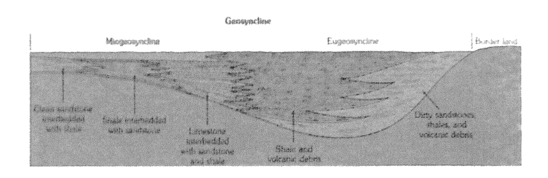
١- **نظرية التقلص** التي تفترض أن باطن الأرض ينقص حجمه مع مرور الزمن بنتيجة التبريد المستمر، الأمر الذي أدى إلى حدوث تقلصات وتجعدات في قشرتها الخارجية نتج منها السلاسل الجبلية. وقد فشلت هذه النظرية في تفسير كثير من الظواهر، مثل وجود هذه الأنظمة على شكل أحزمة طولانية في مناطق محدودة، على الرغم من أنها تفترض تأثر جميع سطح الكرة الأرضية. يضاف إلى ذلك أن قوى الانضغاط الناجمة من التقلص يجب أن تؤدي إلى تشكل طيات بأشكال مروحية. مع أن معظم الطيات المعروفة تميل باتجاه واحد، والأهم من ذلك أن الحرارة الناجمة من النشاط الاشعاعي والتفاعلات الكيميائية في باطن الأرض كافية لأن تهدم الافتراض الاساسي الذي بنيت عليه هذه النظرية.

### ٢- نظرية المقعرات الجيولوجية

تفترض هذه النظرية أن تطور الجبال قد تم في مقعرات جيولوجية تتراكم فيها رسوبات غزيرة مع هبوط تدريجي في قاعها، يلي ذلك خضوعها إلى حركات جانبية ضاغطة. وكان أول من وضعها الجيولوجي الأمريكي هول Hall عام ١٨٥٠ عندما قام بدراسة الصخور الرسوبية المؤلفة للجزء الشمالي من جبال الأبالاش. فقد استنتج، اعتماداً على المستحاثات الموجودة فيها، بأن سماكة الصخور في هذا الجزء يزيد كثيراً على مثيلاتها في العمر نفسه الموجودة داخل القارة. وإن الصخور الرسوبية الكلسية والرملية المؤلفة لها ووجود علامات التموج والتشققات الطينية، تدل على أن هذا السمك الهائل من الصخور الذي يبلغ نحو (٩٥٠٠) متر، قد تراكم في مياه لا يزيد عمقها على بضع مئات من الأمتار، لذلك افترض بأنها تراكمت في منخفض رسوبي ضخم يهبط ببطء كافٍ لمواكبة تراكم الرسوبات المستمر، وعرف هذا المنخفض فيما بعد بالمقعر الجيولوجي Geosyncline (شكل ١١-٣٩).

ثم جاء دانا عام ١٨٧٣ ليجعل هذه الملاحظة أكثر شمولاً، وأثبت أنها تنطبق على كل جبال الأبالاش، وافترض أيضاً أنه بعد تراكم سماكة كبيرة من الرسوبات تبدأ قوى أفقية موجهة من الجانب البحري للمقعر الجيولوجي على ضغط الرسوبات مما يؤدي إلى تقليص القشرة وزيادة سمكها والتوائها، وبهذا يتشكل نظام جبلي شاهق الارتفاع. وقد وجد الجيولوجيون فيما بعد أنه يمكن تطبيق مبدأ المقعر الجيولوجي على نظم جبلية أخرى.

بالرغم أن نظرية المقعر الجيولوجي قد قدمت بعض المعلومات عن النظم الجبلية الموجودة في العالم، إلا أنها لم تأت بشرح كاف للأسباب الكامنة وراء حركات تكوّن الجبال، وما هو السبب الذي أدى إلى هبوط قاع المقعر الجيولوجي، إلا أن ظهور وتطور نظرية تكتونية الصفائح plate tectonics مكنت من الإجابة عن كثير من الأسئلة.

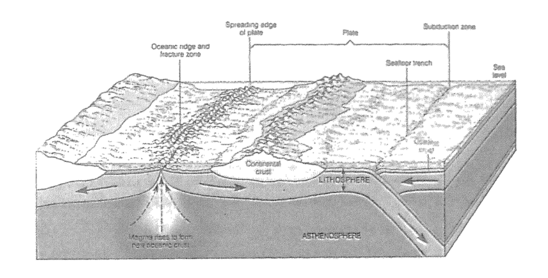



**شكل ١١-٣٩: مقطع عرضاني في مقعر جيولوجي يوضح تشكل الرسوبات في المياه الضحلة (miogeosyncline) والرسوبات في المياه العميقة (Eugeosyncline).**

## ٣- نظرية تكتونية الصفائح وتكوّن الأنظمة الجبلية

ينسب تكوّن الجبال حسب نظرية تكتونية الصفائح plate tectonics إلى أعراف المحيطات ocean ridges وخنادقها ocean trenches. فصفائح الغلاف الصخري lithosphere plates المؤلفة من القشرة الأرضية earth's crust والمعطف الأعلى upper mantle، تنمو وتتجدد باستمرار من النشاطات النارية

والاندفاعات البركانية التي يسببها صعود تيارات ساخنة من صخر المعطف عند أعـراف المحيطات. وبالمقابل فهي تتخرب وتستهلك بالانغراز subduction عند تصادم بعضهـا مع بعض على امتداد خنادق المحيطات (شكل ١١ـ٤٠). وبذلك تتوسع قيعان المحيطات وتتحرك صفائح الغلاف الصخري متباعدة بعضهـا عـن بعـض على جـانبي أعـراف المحيطات، حاملة معها القارات. وبمـا أن صخـور القشـرة القاريـة continental crust أقل كثافة من صخور قشرة المحيطات oceanic crust، فهي لا تجبر على الانغـراز مـن جراء التصادم. وعوضاً عن ذلك تتجعد وتزداد سماكتها على امتداد نطاق التصادم. أما قشرة المحيطات فتهبط وتنغرز تحت القشرة القارية عائدة إلى المعطف، حيث يسبب انصهارها الجزئي نشاطات بركانية في الجانب القاري. ويتشـكل مـن هبوطهـا خنـادق المحيطات، وتصبح هذه الخنادق مجـالاً للـتراكم الرسـوبي الثخـين فـوق أشـرطة طولانيـة هابطة من قشرة الأرض تدعى الأحزمة الحركية mobile belts.




**شكل ١١ـ ٤٠: مقطع عرضاني في الطبقات الخارجية للأرض، توضح كيف تتحرك المغما من المعطف الأعلى داخل مراكز توسع في قاع المحيط. وتتبرد هناك مشكلة قشرة محيطية جديدة. ومن أجل استيعاب المواد الجديدة يتحرك الغلاف الصخري مبتعداً عن عرف المحيط ليغوص وينغرز بشكل تدريجي في المعطف ليسخن فيه ويختلط معه مرة ثانية.**

## أماكن الأحزمة الحركية وطبيعتها:

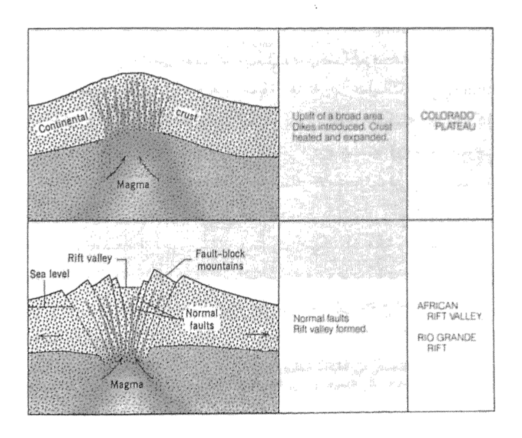
توجد الأحزمة الحركية، التي تتمثل في الأنظمة الجبلية الممتدة على شكل أحزمة طولانية من الصخور الرسوبية والبركانية المشوهة، في نطاقات تصادم صفائح الغلاف الصخري.

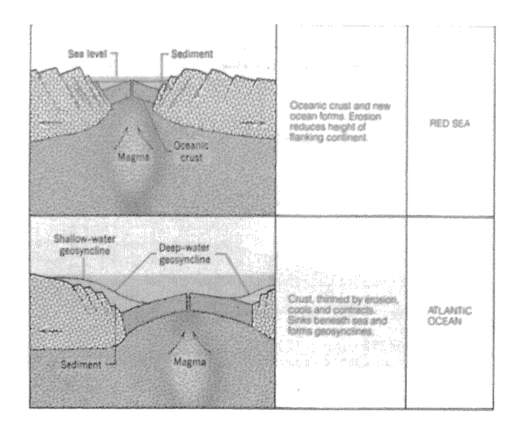
أما التعرف على طبيعتها فيتم من دراسة الأنظمة الجبلية الحالية. ولقد افترض وجود هذه الأحزمة من خلال الدراسات التي أجريت على جبال الأبالاش. فقد لوحظ أن الحزام الحركي لنظام الأبالاش كان خلال فترة من تاريخها مؤلفاً من جزئين متوازيين، الأول داخلي ويقع فوق الرف القاري حيث يتمثل بصخور كلسية ورملية تتداخل فيها رسوبات رملية إسفينية، معظمها قاري، تزداد سماكتها باتجاه القارة. والثاني خارجي، يقع بمعظمه فوق قشرة المحيطات وجزئياً فوق الرف القاري، ويتمثل بصخور الغضار والغضار الصفحي، إضافة إلى بعض الحجر الرملي والرمل الغضاري، وأيضاً من صخور بركانية مترافقة مع الصوان. وتتميز الرسوبات في الجزء الداخلي عن مثيلاتها في الجزء الخارجي بالفرز الجيد well sorting الناتج من فعل الأمواج. ويشير الفرز الرديء في رسوبات الجزء الخارجي إلى تفريغ حمولات رسوبية ضخمة في مياه بحرية عميقة وهادئة. أما عمليات الطي folding فهي إجمالاً شديدة في هذا الحزام، وتترافق مع ظواهر الفوالق العكسية الكثيفة وكتل التحميل الفالقي thrust blocks، إلا أن مظاهر ازدياد شدتها في الجزء الخارجي من الحزام الحركي تكون واضحة تترافق مع مظاهر الاستحالة. وقد لوحظ أيضاً أن الجزء الخارجي من هذا الحزام الحركي مميز باحتوائه على كتل وشرائح من قشرة المحيطات. وتوجد أمثلة أخرى مماثلة في شرق أمريكا الشمالية وفي أقواس جزر شرقي أسيا وغيرها. ولكي نعلل أسباب طبيعة هذه الرسوبات المؤلفة للأحزمة الحركية يجب أن نتابع الأحداث الجيولوجية التي تؤدي إلى انفتاح المحيطات ونهوض الأنظمة الجبلية.

## انفتاح المحيطات وتشكل الأعراف المحيطية

حين يصعد تيار ساخن من صخر المعطف نحو اسفل صفيحة قارية من الغلاف

الصخري فإنه يؤدي إلى تقببها وترققها بالتسخين والشد. وينتهي الشد والترقق في الجزء المقبب إلى تصدعه بفوالق عادية وهبوط أجزائه على امتداد هذه الفوالق (شكل ١١-٤١). وتتراكم في الأودية الهابطة منها رسوبات غزيرة تنتج من حت جبال الكتل الصدعية الموجودة على جانبيها. ومع تتابع هذه الأحداث تتكسر الصفيحة القارية إلى جزئين متباعدين يفصل بينهما عرف لمحيط جديد. يأخذ هذا المحيط بالتوسع من الاندفاعات البركانية المولدة لقشرة المحيطات التي يسببها الانصهار الجزئي في صخر المعطف الأعلى الساخن المتحرر من الضغط على امتداد التصدع. وهكذا يتطور الجزء الداخلي من الحزام الحركي بالشد والترقق والهبوط على امتداد فوالق عادية على جانبي الصفيحتين القاريتين المتباعدتين (شكل١١-٤١ب) ومع استمرار توسع صفيحتي المحيط المتولدتين على جانبي العرف وتصادمها مع الصفحتين القارتين المتباعدتين تهبط قشرة المحيط تحتها وتنغرز في المعطف.

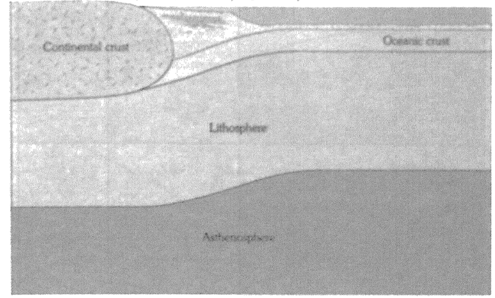




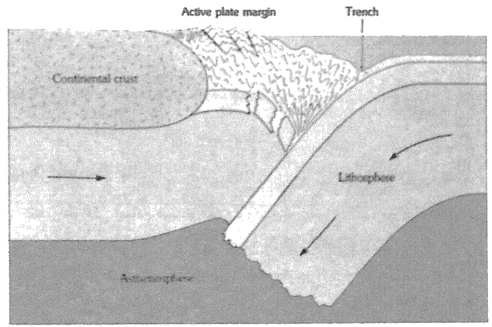

**شكل ١١-٤١: انفتاح المحيطات وتشكل الأعراف المحيطة.**

## نهوض أنظمة الجبال:

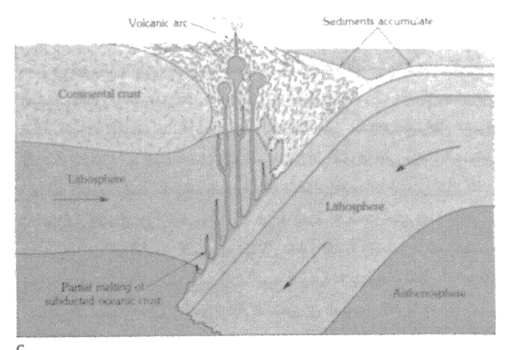
تتميز هوامش تصادم صفائح الغلاف الصخري بأنواع كثيرة من النشاطات من بينها نوعان يأخذان أهمية خاصة في نهوض الجبال. فالنوع الأول نشاط حراري ينجم من انغراز قشرة المحيطات داخل المعطف وارتفاع حرارتها وحدوث الانصهار الجزئي المولد للمغما التي تندفع على السطح بنشاطات بركانية. أما النوع الثاني فهو نشاط ميكانيكي لهبوط قشرة المحيطات وانغرازها يؤدي إلى تعمق رسوبات المقعر الجيولوجي وانضغاطها وتشوهها بالطي والفوالق العكسية والاستحالة، مما يؤدي تدريجياً إلى نهوضها على شكل أنظمة جبلية (شكل ١١-٤٢).


Continental margin
Miogeoclinal
Eugeoclinal
Continental crust
Oceanic crust
Lithosphere
Asthenosphere

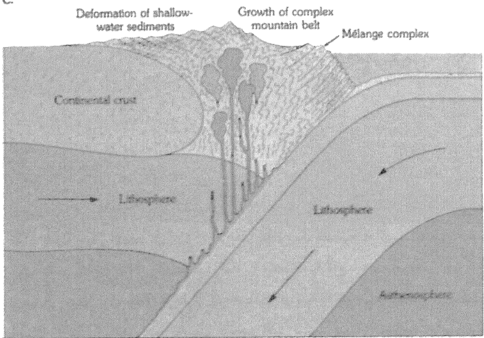
A.


Active plate margin
Trench
Continental crust
Lithosphere

B.




C.




D.

شكل ١١-٤٢: رسم يوضح مراحل تطور الأنظمة الجبلية بنتيجة تصادم صفيحة محيطية مع صفيحة قارية.

A - تصادم صفيحة قارية مع صفيحة محيطية. ويوضح الشكل أيضاً رسوبات المقعر الجيولوجي.

B - أدى تصادم الصفيحتين إلى انغراز القشرة المحيطية تحت القشرة القارية، وإلى تعمق رسوبات المقعر الجيولوجي ودفعها إلى الحافة القارية وانضغاطها وتشوهها بالطي والفوالق.

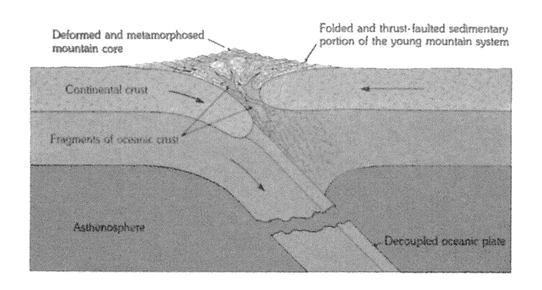
C - أدى انغراز الصفيحة المحيطية في المعطف إلى انصهارها جزئياً وتشكل ماغما انديزيتية تندفع إلى سطح الأرض، مع استمرار تعمق الرسوبات وتشوهها بالطي والتصدع.

D - يؤدي استمرار تعمق الرسوبات إلى انصهارها وتشكل كتل من الباتوليت الغرانيتية مشكلة لب الأنظمة الجبلية، وتخضع الرسوبات إلى استحالة تحت ضغط مرتفع وحرارة منخفضة وتعطي سحنة الشيست الأزرق أما الأجزاء العميقة فتعطي سحنة الغنايس.

وفي العودة إلى تطور المحيطات الحالية، فإن المحيط الأطلسي لا يزال في طور التوسع وبالتالي يزداد عمق دفن الرسوبات المتراكمة في مقعراته الجيولوجية، على امتداد حدوده القارية. لقد بدأ تطور هذه المقعرات على امتداد الشواطئ الشرقية لأمريكا الشمالية منذ نحو (٢٠٠) مليون سنة، إلا أن تطورها على امتداد الشواطئ الشرقية لأمريكا الجنوبية كان متأخراً، لأن انفتاح المحيط الأطلسي كان يتقدم تدريجياً من الشمال إلى الجنوب. وبما أن هبوط قشرة المحيطات تحت هذه المقعرات يشد رسوباتها نحو الأسفل كما يدفع بها إلى الحافة القارية ويجعلها عرضة للتشوه، فإن الأجزاء العميقة من هذه الرسوبات تخضع تدريجياً للاستحالة وتعطي أنواعاً من صخور الشيست والغنايس. ومع ازدياد التسخين في الصخور القارية العميقة يحصل انصهار جزئي تتولد منه مغمات ريوليتية تصعد ببطء نحو الأعلى بسبب لزوجتها العالية ولا تلبث أن تتصلب داخل الصخور التي تغزوها على شكل دسيسات باتوليتية ضخمة. فالتشوهات الأعظمية والاستحالة والانصهار والنهوض الأعظمي هي التي تُشكل لب النظام الجبلي الذي يتطابق مع أعمق أجزاء المقعر الجيولوجي. أما الرسوبات فوق الرف القاري فتنضغط وتنحشر بين كتلة القارة وكتلة الصخور العميقة الناهضة فتنطوي وتتشوه وتنهض أيضاً لتشكل المجالات الهامشية من النظام الجبلي الجديد. وتوجد في كثير من أنحاء العالم أجزاء من صفائح الغلاف الصخري منغرزة تحت صفائح متصادمة معها، كما توجد أنظمة جبلية في طور النهوض نذكر منها جبال الأنديز في شرق أمريكا الجنوبية، فصفيحة المحيط المنغرزة هي صفيحة نازكا Nazca والصفيحة القارية المتصادمة معها هي أمريكا الجنوبية، وخندق المحيط فوق نطاق الانغراز هو خندق البيرو ـ تشيلي (شكل ١١ـ٣٤)، والنظام الجبلي الناهض هو جبال الأنديز التي تنتشر فيها النشاطات البركانية. ويُعتقد أن هذه النشاطات البركانية التي تحدث باستمرار على الجانب القاري من التصادم تقوم بدور رئيس في تطور هذا النظام الجبلي.

أما جبال الهيمالايا والألب التي تعد من أشهر الأنظمة الجبلية في العالم فتتميز بنهوض شديد وتضاريس حادة وذرى شاهقة ووقوعها داخل القارات. ويعود نهوضها إلى تصادم صفائح قارية، فجبال الهيمالايا نهضت من تصادم صفيحة

القارة الهندية مع كتلة التيبت الأسيوية، كما نهضت جبال الألب من تصادم صفيحة القارة الأفريقية مع الصفيحة الأوربية، وأدى ذلك إلى انغلاق محيط التيتس القديم. وأثناء الإنغلاق تعرضت كميات هائلة من الرسوبات إلى ضغوط عالية أدت إلى التوائها مشكلة طيات مسطحة امتدت لمسافات كبيرة في اتجاه الشمال على شكل غطاءات تحميل ضخمة. وقد انطوت داخل هذه الرواسب قطع مكسرة من القشرة المحيطية على طول نطاق تصادم الكتلتين (شكل ١١-٤٣).

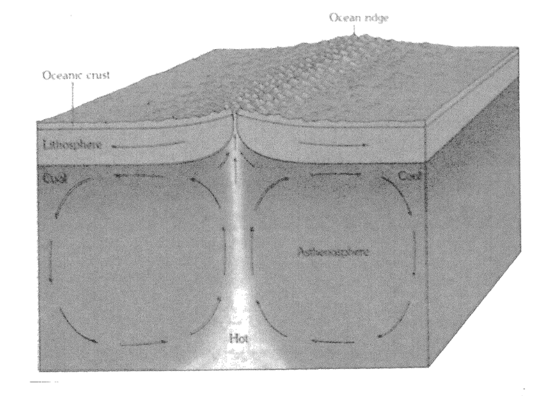



**شكل ١١-٤٣: رسم يوضح تشكل جبال الألب من تصادم صفيحتين قاريتين. ويوضح الشكل قطع قشرة محيطية مكسرة على طول التحام الكتلتين.**

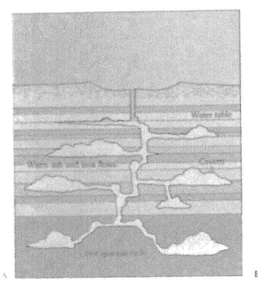
أما جبال الأبالاش التي عاصرت في نهوضها جبالاً تقع حالياً في غربي أوربا. فيعتقد أن تطورها كان في مقعر جيولوجي يتبع محيط أطلسي أقدم من الحالي ببضع مئات من ملايين السنين، حين تحركت صفيحة القارة الأوربية لتتصادم مع أمريكا الشمالية، وأدى هذا التصادم إلى نهوض نظام جبلي في قارة البانجيا القديمة. ثم انفصلت جبال الأبالاش عن جبال غربي أوربا حين تكسرت هذه القارة القديمة

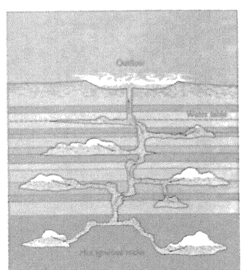
وتباعدت أجزاؤها، ويعتقد أيضاً أن أنظمة جبلية قديمة تقع داخل القارة الأسيوية، كجبال الأورال التي تعود تشكيلاتها الرسوبية إلى أزمنة الباليوزوي قد نهضت من تصادمات قارية مماثلة.

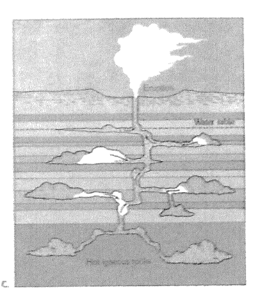
وتعطي ملاحظات الدروع القارية القديمة دلائل تشير إلى إحتوائها على أنظمة جبلية غابرة أقدم بكثير من الباليوزوي. ولهذا يعتقد العلماء أن حركات صفائح الغلاف الصخري كانت تجري منذ أقدم الأزمنة الجيولوجية وأدت إلى التحام الكتل القارية وانفصالها مرات متعددة. وأخيراً لا بد من القول، بدون تأكيد، إن هذه الحركات تتبع مراحل تاريخية متعاقبة، بحيث تنتهي كل واحدة منها بتشكل خلايا جديدة من تيارات الحملان داخل المعطف بنتيجة التوزع غير المتساوي للحرارة في أعماق الأرض، وهو كما يعتقد دافع رئيس لتكسر الغلاف الصخري وتحرك أجزائه الصفيحية (شكل ١١-٤٤).



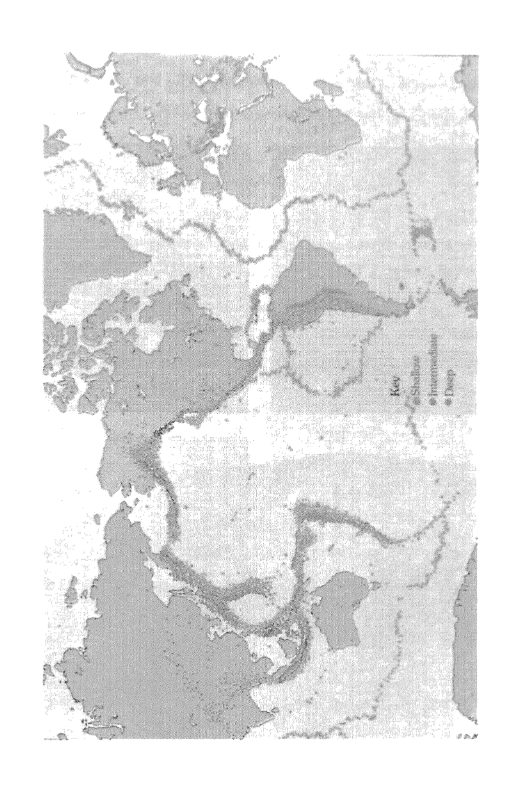

**شكل ١١-٤٤:يوضح تيارات الحملان وتكسر الغلاف الصخري.**



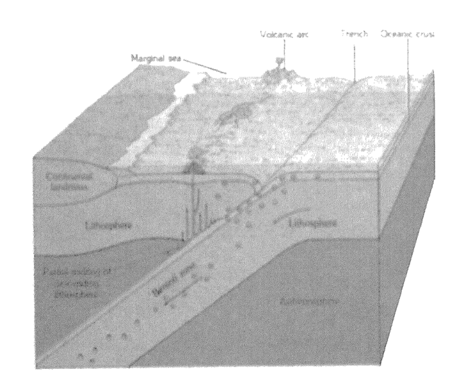



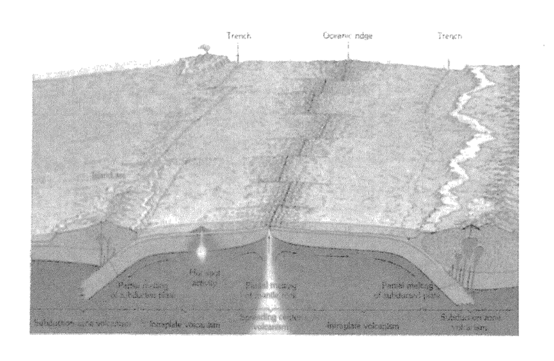

شكل ٤ـ١٦: رسم نمونجي للجيزر: A ـ مرحلة تجمع المياه الجوفية في تجاويف وممرات عاموبية.
B ـ تسخين المياه بوساطة الصخور النارية الحارة يؤدي إلى تمددهـا وانسيابها على السطح.
C ـ انسياب المياه على السطح أدى إلى انخفاض الضغط عند القاع وحدوث الغليان، والاندفاع على هيئة بخار مما يسبب في فورانها وتفجرها.




شكل ٩-١١: توزع الأحزمة الرئيسة للزلازل على سطح الكرة الأرضية
a - أحزمة الزلازل الضحلة
b - أحزمة الزلازل العميقة.




شكل ٩ــ١٣: نطاق بينوف وتوزع البوز الزلزالية.




**شكل ١٠ــ٩: مقطع في الغلاف الصخري يوضح البركنة على امتداد أنظمة أعراف المحيطات ونطاقات الانغراز.**



شكل ١١ــ٥: تشوه على نطاق واسع يُظهر بنية البوديناج.
تمثل القطع المتطاولة الصخور القاسية، وبينها الصخور اللدنة.

# الفصل الثاني عشر

# تطبيقات الجيولوجيا

## المواد المفيدة والطاقة

بحثنا سابقاً في الفلزات والصخور، وفي العمليات الجيولوجية، والأشكال التضاريسية الناجمة عنها. وبهذا يكون لدينا معلومات مفصلة ووافية عن المواد والعمليات التي يعتمد عليها علم الجيولوجيا. ولكن يبقى علينا أن نعرف ما هي الفائدة العملية التي نحصل عليها من هذه المعلومات، وما هي صلتها بالموضوعات والنشاطات التي نهتم بها في حياتنا اليومية.

تتطلب الحضارة الحديثة مقداراً كبيراً من المواد، وكميات ضخمة من الطاقة، والطبيعة تنتج هذه المواد والطاقة عن طريق العمليات الجيولوجية التي نحن بصددها.

### المــــواد Materials

يمكن تقسيم المواد التي تستعمل في يومنا الحاضر الى قسمين:

آ- **المعادن Metals**: مثل الالمنيوم، النحاس، الذهب، الحديد، الفضة، القصدير، البلاتين، الكروم، النيكل، الرصاص، التوتياء.

ب - **اللامعادن Non - metals**: مثل الماس، الملح، الحجر الكلسي، الغضار،

الصخور الفوسفاتية، الاسبستوس (الاميانت).

وهذه المواد يمكن ان توجد بأشكال وكميات مختلفة في كل مكان، ولكن عندما توجد بكميات وتجمعات وفيرة يمكن تعدينها والاستفادة منها وتعرف بالتوضعات الفلزية mineral deposits.

والطريقة الملائمة للبحث عن التوضعات الفلزية هي أن تصنف على اساس العمليات الجيولوجية التي أوجدتها مثل: النشاط الناري والتجوية والترسيب.

## التركيز بالنشاط الناري

ذكرنا سابقاً ان الصخور النارية تتكون من خليط من العناصر في محلول يدعى المغما أو المهل. وبعض المغما يحتوي على عناصر لاتتحد مع الفلزات المكونة للصخور لكبر حجوم شواردها. واحياناً اخرى تتبلور هذه العناصر في مرحلة مبكرة من تبلور المغما وتنفصل عن المحلول. وفي بعض المرات تتشكل مؤخراً وتحتبس في المغما المتبلورة. وغالباً تبقى ممزوجة مع المواد الطيارة الساخنة بما فيها الماء، وتحقن في الصخور المحيطة.

### التركيز الفلزي mineral concentraion

أ ـ **الماس Diamond**: فلز مؤلف من عنصر الكربون، وهو أكثر الفلزات ندرة بين الاحجار الكريمة، ويقع في قمة الفلزات المفيدة من حيث القيمة الاقتصادية. ويتصف بقساوته العالية، حيث يستعمل كثيراً في الصناعة في آلات القطع والسحج، كما يتصف بقرينة انكساره العالية التي تجعل بلوراته تتألق بانعكاسات ضوئية جميلة جداً. وكلما زادت شفوفية بلوراته، زادت قيمته الاقتصادية.

ويتشكل الماس في المغما حين يكون الكربون محتسباً فيها تحت ضغط هائل. لذلك لانتوقع ان نجد الماس في أماكن لم تتوفر فيها هذه الشروط.

وأشهر توضعات الماس تقع في مداخن بركانية قديمة تحوي صخور الكمبرليت، في جنوب افريقيا، وهي صخور فوق أساسية بيريدوتيتية غنية بالاوليفين، ويوجد فيها الماس على شكل حبيبات مشتتة. وتأخذ الصخور شكل أنابيب تضيق باتجاه الاسفل، وتدعى انابيب الكمبرليت، تندس ضمن صخور قديمة تعود الى ما قبل الكمبري. وغالباً ما تظهر آثار التجوية في أجزائها العلوية.

## ب ـ البلاتين والنيكل والكروم

توجد توضعات البلاتين في صخور فوق أساسية، وبخاصة التي تحتوي على توضعات النيكل والكروم. ومن الواضح أنها تشكلت في المراحل الاولى من تبلور المغما، ولكونها أثقل الفلزات فهي تستقر في أسفلها. ويوجد البلاتين في حالة حرة، اما توضعات النيكل والكروم فتوجد على شكل مركبات متحدة مع عناصر اخرى.

**البلاتين:** يوجد البلاتين في توضعاته اما بحالة حرة او ضمن خلائط معدنية مثل بلاتينيريديوم Platiniridium، وقد يوجد أحياناً في مركبات فلزية أهمها السبيريليت Sperrylite (Pt As2).

تعتمد أهمية البلاتين الصناعية على درجة انصهاره العالية (١٧٥٥° مئوية) ومقاومته للعوامل الكيميائية. هذه الخواص تجعله مفيداً في الادوات المخبرية، وفي نقاط تماس القاطعات الكهربائية، وفي صناعة الاسنان وفي التصوير، وأخيراً في صناعة الحلي.

**النيكل:** بالرغم من ان النيكل عنصر نادر نسبياً، فهو ذو أهمية كبيرة في الصناعة الحديثة، اذ يستعمل في تصنيع الخلائط القوية والخشنة مثل الفولاذ النيكلي (٢,٥٪ـ٣,٥٪ من النيكل). وفي تحضير المونيل Monel (٦٨٪نيكل و٢٨٪نحاس ٤٪من المعادن الاخرى). ويستعمل أيضاً في عمليات الطلاء المختلفة وفي صك العملات، وأخيراً يستخدم في صنع نوابض الساعات لتمدده المنخفض.

يعد فلز البنتلانديت Pentlandite [(Fe, Ni)9 S8] الفلز الخام الرئيس للنيكل، وتقع أشهر توضعاته في سادبوري واونتاريو.

**الكروم:** يعد الكرومَيت Chromite الفلز الرئيسي للكروم، اذ يتألف من ٦٨٪ من اوكسيد الكروم $Cr_2O_3$ و٣٢٪ من FeO. وتعد الولايات المتحدة اول دولة منتجة للكروم عام ١٨٦٠ من شاستا وكاليفورنيا، ولكن اليوم تعد روسيا الدولة الاولى المنتجة له.

يستعمل الكروم بشكل رئيس لتكوين الخلائط مع الفولاذ، حيث يعطي خلائطه صلابة وقساوة ومتانة مرتفعة، اضافة إلى مقاومته للتأكسد والتآكل والبري، وللمواد الكيميائية والكهرباء والحرارة. وتعتمد صناعة الآلات الميكانيكية والسيارات والطائرات والقطارات كثيراً على خلائط فولاذ الكروم. ويستعمل هذا المعدن أيضاً في طلاء المنتجات المعدنية، وفي صناعة الأصبغة والمواد الكيميائية المزيلة للالوان. كما يستفاد منه كعامل مؤكسد.

## جـ ـ الذهب والنحاس والقصدير

تتوضع هذه المعادن من المحاليل الهيدروترمالية التي تحقن في الصخور المحيطة بالمغما.

**الذهب:** عرف الذهب منذ القديم كمعدن ثمين واستعمل في أغراض التزيين، وصناعة الحلي وصك النقود. وان اول ارتفاع عالمي في انتاج الذهب حدث حين اكتشاف القارة الامريكية، حين بدأت عواصم الدول الاوربية تغتني بهذا المعدن المكتشف. وقد أصبحت الولايات المتحدة أول الدول المنتجة للذهب منذ عام ١٨٠١ ثم تبع ذلك اكتشافه في استراليا وجنوب افريقيا.

توجد توضعات الذهب في مناطق النشاط الدسيسي، بخاصة المعطي للصخور النارية المتوسطة الحمضية. ويوجد في معظم الأحوال بحالة حرة ونادراً ما يكون نقياً، حيث تخالطه عناصر معدنية أخرى أهمها الفضة. وأحياناً يوجد ضمن مركبات فلزية ناجمة من اتحاداته مع عنصر التيلوريوم وتسمى بتيلوريدات الذهب Gold tilurides أو ضمن محاليل صلبة معدنية.

يتم استخلاص الذهب الحر بالطحن، فالملغمة، ثم التنقية بالتحليل الكهربائي،

وحين يترافق مع الكباريت يصار إلى شي الكباريت ثم استخلاص الذهب منها.

**النحاس:** توجد توضعات النحاس في الطبيعة في حالة حرة أو ضمن مركبات فلزية. منها كباريت معدنية، ومنها أكاسيد، ومنها كربونات أو كبريتات أو سيليكات أو كلوريدات. ويوجد في الطبيعة نحو ١٥٦ فلزاً معروفاً يدخل في تركيبها النحاس، إلا أن الفلزات الرئيسة لهذا المعدن هي الكالكوبيريت Cu Fe S2 والبورنيت Cu5 FeS4 والكالكوسيت Cu2S.

ان اغلب توضعات النحاس الهامة، قد نشأت من محاليل هيدروترمالية مع سيطرة الاستعاضة على ملء الفراغات، إلا أن توضعات الكالكوسيت، تكون عادة نتيجة اغناء كباريتي لاحق.

يأتي النحاس بالدرجة الثانية بعد الحديد من بين المعادن الرئيسية التي يعتمد عليها في الصناعة. وبخاصة في صناعة اللوازم الكهربائية (أسلاك، نواقل، ملفات أدوات متنوعة)، كما يستهلك جزء كبير منه في صناعة الذخائر الحربية، والأدوات المنزلية.

ومن أهم خلائط النحاس نذكر: البرونز، ويتألف من ٨٨٪ نحاس و١٠٪ قصدير و٢٪ توتياء، والصفر ويتألف من خليطة من نحاس وتوتياء تتراوح فيها نسبة النحاس بين ٥٥ ـ٩٩٪، والفضة الالمانية هي خليطة من النحاس والتوتياء والنيكل.

**القصدير:** ان الانماط الرئيسية الجيدة لتوضعات القصدير، المستثمرة في العالم، تعود في منشئها إلى النشاط الهيدروترومالي المالئ للفراغات. ويعتقد أن القصدير قد نقل من المهل بحالة غازية، على شكل كلور القصدير أو فلور القصدير، اللذين يمكن أن يعطيا فلزات الكاستيريت بتفاعلهما مع الماء. ويدل على النشاط الهيدروترمالي، مرافقة هذه التوضعات لصخور الغرانيت، وفساد الجدران الغرانيتية الملامسة لها. وان ٧٥٪ من قصدير العالم يعود في منشئه إلى التركيز الميكانيكي.

يعد الكاسيتيريت Cassiterite الفلز الخام الوحيد للقصدير، ويرافقه شوائب من الكوارتز والبيريت والماركاسيت.

يستعمل القصدير في طلاء المعادن لحمايتها من الصدأ، وفي صناعة خلائط الصفر والبرونز وفي مواد اللحام، وفي صناعة الصفائح الرقيقة وصفيح المعلبات، وفي صناعة بعض أنواع انابيب التمديدات وفي الصناعة الكيميائية.

### د ـ توضعات الرصاص والتوتياء:

بالرغم من عدم التشابه في الصفات الكيميائية لهذين المعدنين، فإنه يوجد ارتباط جيولوجي بينهما، ناجم من ترافق فلزات هذين المعدنين في التوضعات نفسها، بخاصة كباريتهما (الغالينا والسفاليريت).

إن أكثر توضعات الرصاص ـ توتياء قد نشأت من نشاط هيدروترمالي مالئ للفراغات، أو استعاضة تماسية داخل الصخور الكربوناتية الكلسية والدولوميتية. وتعد مراحل هذا النشاط بصورة عامة مراحل منخفضة الحرارة، حيث تستبدل بعض مركبات الصخور المحيطة المغما خامات الرصاص والتوتياء، وتحصل الاستعاضة بخاصة في الصخور الكلسية.

يستعمل الرصاص في صناعة أحرف الطباعة، وفي حماية التمديدات الكهربائية وأنابيب تمديدات المياه والغاز. والصفائح المعدنية الرقيقة وصفائح المدخرات. أما التوتياء فتستعمل في بعض الخلائط وفي صناعة البطاريات وفي طلاء المعادن.

## التركيز بالتجوية

## Concentration by Weatehring

لقد عرفنا سابقاً التجوية بأنها مجموعة عمليات جيولوجية تؤدي إلى تحطيم الصخور، وتشكيل مواد منحلة ومواد متبقية. وهنا نركز في مجال دراستنا لتشكل التوضعات الفلزية على المواد المتبقية التي يمكن أن نصنفها إلى:

**١ـ مواد متبقية:**

ويمكن أن تكون:

آ ـ مواد متبقية على شكل ترب عادية ليس لها أهمية اقتصادية.

ب ـ مواد متبقية تتركز فيها فلزات مفيدة تعرف بتوضعات التركيز المتبقي residual concentration deposits، حيث يتشكل بعضها بنتيجة التجوية الكيميائية للصخور المحتوية على الفلزات الصفاحية، مثل تراكم اكاسيد الالمنيوم المائية (البوكسيت) من تجوية صخور السيانيت بشروط مناخية حارة ورطبة. ويعد البوكسيت المصدر الرئيس لمعدن الالمنيوم. وتوجد التوضعات الرئيسة له في ولاية اركنساس الامريكية.

إن الالمنيوم هو آخر المعادن المكتشفة بالرغم من وجوده بكثرة في صخور القشرة الأرضية، ولكن صعوبة استخلاصه من فلزاته لم تذلل الا في نهاية القرن التاسع عشر، لذلك يطلق عليه اسم معدن القرن العشرين.

والالمنيوم معدن خفيف ومقاوم للعوامل الجوية بالاضافة الى ناقليته الجيدة. ان صفاته هذه هي التي أعطت مكانته الصناعية فهو يستعمل في الصناعات كافة مثل أدوات المطبخ، والمفروشات، والطائرات، والقطارات وفي النواقل الكهربائية.

وتتشكل بعض توضعات التركيز المتبقي نتيجة تخليص المواد المفيدة من الشوائب والمركبات الاخرى المرافقة لها، وهذا ما يجعلها أكثر تركيزاً من السابق. فمثلاً يؤدي انحلال الصخور الكلسية التي تحتوي على اكاسيد حديد الى تركيز هذه الاكاسيد في أمكنة الانحلال. وقد يصل هذا التركيز الى تشكل توضعات حديدية مفيدة. وكذلك تجوية الصخور النارية الاساسية، في المناطق المدارية وتحت المدارية، تعطي تربة لاتيريتية غنية بأكاسيد الحديد. وأيضاً تجوية عروق أو صخور تحوي السيديريت أو كباريت الحديد، يؤدي إلى اغنائها بأكاسيد الحديد وتشكل توضعات هامة للحديد.

**٢ـ محاليل متبقية**

ويمكن ان تترسب تحت سطح الارض على شكل توضعات أكاسيدية، أو تتفاعل مع توضعات الكباريت المعدنية مؤدية إلى اغنائها، وهي ما يسمى توضعات

الاكسدة والاغناء الكباريتي اللاحق.

تؤكسد المياه السطحية عـدداً كبيراً من فـلزات التوضعـات المعدنيـة، وبخاصـة الكباريت المعدنية، وتنقلها نحو الاسفل على شكل كبريتـات منحلـة، يمكـن أن يتوضع جزء منها ضمن نطاق الاكسدة تحت تأثيرات كيميائية مختلفة، مما يؤدي إلى تراكم هذه المواد وتشكل توضعات اكاسيدية. وحين تنضـم هـذه المحـاليل إلى المـاء الجوفي، فإنها تخضع لتفاعلات كيميائية بوسط يفتقـر إلى الاكسـجين، وينتـج منهـا توضع كباريت معدنية مفيدة تتراكم أسفل منسوب الماء الجوفي، ضمن نطاق يدعى بنطاق الاغناء الكباريتي اللاحق.

## التركيز بعمليات ترسيبية

تنقل المياه الجارية كميات كبيرة من المواد الفلزية في أقنية وجـداول وبخاصـة في المناطق الجبلية. وتميل الفلزات المعدنية الثقيلة إلى التكدس في مجاري هذه الميـاه علـى شكل ترسبات تدعى بالتوضعات المكيثة placer deposits وقد استعملت كلمـة مكيث placer في البداية من أجل تمييز توضعات الذهب الرسوبية.

وتشمل عملية التركيز هذه مرحلتين: الاولى ويتم بهـا تحرير الفلزات المقاومـة للفساد بعوامل التجوية، والثانية يتم بها تركيز هذه الفلزات بعمليات النقل.

تحرر التجوية الذهب من الصخور والعروق الأولية التي تحوي عليه. وان قابليتـه للطرق والسحب تحميه من السحق. بالاضافة إلى أن وزنه النوعي المرتفع (١٥-١٩) يؤدي إلى ترسيبه بسرعة في قاع المجرى المائي.

اكتشف الذهب على شكل توضعات مكيثة عام ١٨٤٨، في المنحـدرات الغربيـة، لجبـال السيرانيفادا في كاليفورنيـا، وكـان ذلـك بكميـات ضخمـة. ويتـم تخليص الذهب من الشوائب المرافقة بعملية تصويل عادية. أما في التوضعات المكيثـة الفقيرة نسبياً فيستخلص بطرائق هيدروليكية Hydraulicking، حيث يطبـق علـى التوضع تيار مائي قوي يجرف معه الخامـات، ليسير بهـا الى قناة منحـدرة، ذات

مصائد اصطناعية تترسب عندها الفلزات المرغوبة، وتخرج الشوائب من نهاية هذه القناة.

وهناك طريقة آلية لجرف رواسب تحت مائية، حيث يتم استخراج الذهب بوساطة كراكات Dredges مؤلفة من مجارف دورانية ميكانيكية، توصل إلى آلات ضخ وتصويل. وتحفر الكراكة تحت الماء لتفرز المواد المفيدة في داخلها، وتلقي بالنفايات في الطرف المقابل من الحفرة.

إن أضخم ثروات الذهب في العالم موجودة في توضعات ويت ووتر سراند Witwatersrand في جنوب افريقيا، وتقع على هضبة تقع على ارتفاع ٦٠٠٠ قدم فوق منسوب سطح البحر وعلى بعد ٥٠٠ ميل شرق مدينة الكاب. ان كلمة ويت ووتر سراند تعني الأرض البيضاء المرتفعة، وسميت بذلك لانها مشهورة بصخور الكوارتزيت البيضاء التي تقاوم التجوية حيث تنتصب واقفة على حافة الماء.

توجد التوضعات في هذه المنطقة ضمن طبقات رقيقة من الصخور التجمعية المؤلفة من كوارتز معاد تبلوره، وسيريسيت وكلوريت وتورمالين وكالسيت، وذهب على شكل حبيبات ناعمة (٠,١-٠,٧مم)، اضافة إلى عروق صغيرة من الذهب تمر من الملاط إلى حبيبات الكوارتز التجمعية.

ويعتقد بعض الجيولوجيين أنها تشكلت من توضعات مكيثة قديمة، بينما يعتقد آخرون أنها تشكلت نتيجة اختراق الصخور الأصلية بمحاليل هيدروترمالية حاملة للذهب. ويمثل انتاج هذه المنطقة ٤٠٪ من الانتاج العالمي.

وكذلك فإن ٧٥٪ من قصدير العالم يأتي من توضعات مكيثة لفلز الكاسيتيريت Cassiterite ‏(SnO2) أو ثاني أكسيد القصدير ذي الوزن النوعي المرتفع (٧).

إن أضخم ثروات الحديد في العالم قد تشكلت بعمليات الترسيب. وتعد رسوبات الحديد هذه مكامن ذات قيمة اقتصادية، ويمكن أن تزيد عمليات التجوية في تركيزها . فمثلاً في منطقة ليك سوبريور Lake Superior، يتألف النطاق

الذي لم يغسل بعمليات التجوية من تاكونيت، (نسبة الحديد فيه حوالي ٢٥٪). وبالمقابل فإن معظم الحديد المستثمر قد تأكسد إلى هيماتيت، حيث يعطي فلزاً خاماً نسبة الحديد فيه ٥٠ ـ ٦٠٪، وذلك في المناطق التي خضعت لعمليات غسل.

وهناك توضعات حديد رسوبية تعود للدور السيلوري تعرف بخامات كلينتون Clinton ores تمتد في ولايات ويسكونسين ونيويورك وألاباما الامريكية. وتتصف الخامات الأولية لهذه التوضعات بتماسكها واحتوائها على نسب لا بأس بها من كربونات الكلسيوم، وتتراوح نسبة الحديد فيها بين ٣٥ ــ ٣٨٪. أما الخامات الواقعة في أماكن سطحية غسلت بالمياه فتصبح غير متماسكة، فقيرة بالكلس وغنية بالحديد بنسبة تتراوح بين ٥٠ ـ ٦٠٪.

## التركيب الأصلي للصخور
## Orginal Rock Formation

نحصل على كثير من المواد المفيدة مباشرة من الصخور الأصلية، دون أن يطرأ عليها عمليات تركيز أو اغناء لاحق. فالحجارة مثلاً استعملت منذ عدة قرون كمواد للبناء، و لم تظهر أهميتها بشكل هائل إلا في النصف الثاني من هذا القرن، وذلك باكتشاف طرائق فنية جديدة لاستخلاصها من الأرض بوساطة التفجير، أو قطعها في احجام قابلة للاستعمال.

وتأخذ بعض الصخور قيمة تجارية لخواصها الكيميائية. فمثلاً الصخور الكلسية، تستعمل لفصل الحمض في عمليات تصنيع السكر، كذلك في تزويد النباتات بالكلسيوم. وتستعمل أيضاً في صناعة الاسمنت، مثل الاسمنت البورتلانـدي الذي يتألف من ٧٥٪ من كربونات الكلسيوم و١٣٪ من السيليكا و٥٪ من أكسيد الالمنيوم.

### الصخور الفوسفاتية

وهو اصطلاح شائع يستعمل لصخور رسوبية تحتوي على نسبة عالية من المادة

الفوسفاتية وخاصة فلز الابـاتيت Ca5(PO4)3 (Cl,F,OH)، بالاضافة إلى الشوائب الكلسية والغضارية والسيليسية وبعض المواد العضوية. وتستخدم الفوسفات بالدرجة الاولى في تسميد التربة.

توجد الصخور الفوسفاتية بكميات ضخمة في أمريكا حيث تقدر الكميات الموجودة في جبال الروكي بـ ٦ملايين طن تكفي لعدة قرون. ويوجد أيضاً احتياطات أخرى بكميات كبيرة متوافرة في كثير من أنحاء العالم.

أما الفوسفات السورية فتوجد ضمن تشكيلات تابعة للكريتاسي الاعلى والايوسين، وتأخذ هذه الرسوبات أهميتها الاقتصادية في المناطق الواقعة على منحدرات الجزء الجنوبي من السلسلة التدمرية، وفي منطقة الحماد السورية.

**الاسبستوس Asbestos**

وهو فلز ليفي حريري مرن يوجد في الصخور الاستحالية. إن أهم أنواع الاسبستوس التجارية هي الكريزوتيل Chrysotile [Mg6 (Si4010) (OH)[8]] أو الاسبستوس الأزرق. والكروسيدوليت Cricidolite [Na3 Mg4 Al (Si8 022) (OH.F)[2]] وتمتاز هذه الأنواع بطول أليافها ونعومتها ومرونتها وقابليتها الجيدة للغزل والنسيج، وهي تقاوم الحرارة وفعل الحموض وعازلة للكهرباء والحرارة، لذلك تصنع منها أنسجة وحبائل وفتائل حرارية وكيميائية وكهربائية.

**الصخور الملحية**

الملح أكثر المواد وجودا في العالم، ويتشكل نتيجة تبخر المياه البحرية ويكون مرافقاً للجص، وتتراوح سماكة طبقاته بين بضعة أقدام إلى بضع عشرات من الأقدام. أما في القباب الملحية فتصل سماكة طبقاته إلى ألوف من الأمتار. ومع أن شكل وتاريخ القبب الملحية يختلف من مكان لآخر، لكنها جميعها تميل إلى أخذ الشكل الاسطواني.

## مصادر الطاقة المتوفرة اليوم

نستطيع بمعلوماتنا الحالية أن نحدد بعض مصادر الطاقة التي عرفها الإنسان منذ القديم كالفحم والبترول والغاز الطبيعي. وهذه المواد لا يمكن الاستفادة منها ما لم تكن قد مرت بعمليات تركيز جيولوجية مختلفة. أما الطاقة المتولدة منها فتدعى بالطاقة الكيميائية.

### الطاقة الكيميائية

لقد كان اكتشاف النار واستعمالاتها أول خطوات الانسان عبر طريق الحضارة، وما زالت حتى يومنا هذا تخدم أسس الحضارة. فالنار هي النمط الاشتعالي في حادثة الاكسدة، حيث يتحد الاوكسجين كيميائيا بالكربون وغيره من عناصر المواد العضوية ليعطي الحرارة والضوء. وان الفحم والبترول والغاز هي أكثر قابلية للاحتراق والاشتعال بالمقارنة مع المواد الأخرى. تتشكل هذه المواد من تفسخ المواد العضوية بمعزل عن الهواء، حيث تطرد منها المركبات الأقل قابلية للاحتراق وتتركز فيها العناصر الأكثر قابلية للاحتراق: الكربون والاوكسجين والهيدروجين. فعندما تحرق المواد العضوية تتحرر كميات كبيرة من الطاقة الكيميائية على شكل طاقة حرارية، يمكن استخدامها مباشرة أو تحويلها إلى أشكال أخرى من الطاقة كالطاقة الكهربائية.

### الفحم الحجري

هو الناتج النهائي لتفحم المواد النباتية المتراكمة في أراض مستنقعية منذ ملايين السنين. ويعتمد حجم وسماكة طبقات الفحم على طبيعة المستنقع كبيئة للتشكل من جهة، وعلى كمية المواد النباتية المتراكمة من جهة ثانية.

تتميز الأنواع المختلفة للفحم الحجري حسب نسبة الكربون المثبت فيها والتي تتناسب طرداً مع درجة التفحم. وأول مراحل تفحم البقايا النباتية يتمثل بالتورب، حيث تبلغ نسبة الكربون المثبت فيه إلى ٦٠٪ بينما تصل في أكثر أنواع الفحم الحجري جودة (الانتراسيت) إلى نحو ٩٥ ــ ٩٨٪. ويوجد بالاضافة إلى عنصر

الكربون في الأنواع المختلفة للفحوم الحجرية، عناصر أخرى تبلغ نسبتها حوالي أقل من ١٪ كالصوديوم والبوتاسيوم والكلسيوم والالمنيوم والسيليسيوم والحديد والتيتانيوم وبنسب أقل حوالي ٠,٠١٪ من الليتيوم والروبيديوم والكروم والكوبالت والنحاس والغاليوم والجرمانيوم والنيكل والتنغستين والزركون واللنثانوم.

تعتبر بعض أنواع الفحم الحجري مناسبة للتقطير وانتاج فحم الكوك، الذي تعتمد عليه صناعة الحديد والصلب، ومثالها الفحم الحمري Bituminous coal وتصل نسبة ما تستهلكه هذه الصناعة من إنتاج الفحم الحجري السنوي في العالم إلى الربع. وتعود أهمية فحم الكوك الصناعية إلى استخدامه كمصدر حراري وفي ارجاع خامات الحديد الاكاسيدية.

**التنقيب عن الفحم الحجري**

ويتم بالاستكشاف الجيولوجي السطحي أو بطرائق الحفر العميقة، وهي الطرق المثلى لمعرفة سماكة راقات الفحم ونوعيتها وطبيعة الصخور المحتوية عليها. ويجب أن لا تقل سماكة راق الفحم الحجري عن القدم حتى يمكن استثمارها اقتصادياً.

**احتياطي الفحم الحجري:** تشير التقديرات الحديثة، إلى أن نحو نصف احتياطي فحم العالم يقع في شمال وجنوب الولايات المتحدة. وهذه التقديرات تعتمد على الخرائط الجيولوجية المتوفرة، ومن المحتمل أن تكشف عمليات الاستثمار أن كميات الفحم المتوافرة هي أقل من الاحتياطي المتوقع وجوده، بسبب الانكسارات أو غياب الطبقات أو وجودها بسماكات غير اقتصادية. فمنذ عدد من السنين كانت سماكة الطبقات المستثمرة تزيد على ١٠٠ قدم، لكنها تناقصت حالياً إلى نحو ٥ أقدام.

تجري عمليات استخراج الفحم الحجري في كثير من بقاع العالم، وتساهم ولايتا بنسلفانيا وفرجينيا بأكبر جزء من إنتاج العالم. واستناداً إلى التقديرات الحديثة، إن الاحتياطي المتوافر في العالم من الفحم الحجري يغطي تقريباً استهلاك ٢٠٠٠ سنة

قادمة، إذا استثمر بالمعدل الحاضر نفسه.

## البترول والغاز الطبيعي

يحل البترول والغاز الطبيعي تدريجياً محل الفحم الحجري، نظراً لكونه أكثر فعالية وأسهل تداولاً. وإن توافر المصادر البترولية في الولايات المتحدة، كان له الفضل الأكبر في التطور الصناعي ورفع سوية الحياة فيها. ومع أن مصادر الفحم الحجري وخامات الحديد المتوافرة في بريطانيا قد ساهمت بشكل فعال في ثورتها الصناعية، إلا أنها تشتري البترول والغاز من الأقطار الأخرى، نظراً لكون طبيعة أراضيها الجيولوجية لا تحتوي على أحواض ترسيبية ضخمة ملائمة لتطور أحواض البترول والغاز الطبيعي.

**ما هو البترول وما هو الغاز الطبيعي** تتشكل هاتان المادتان من بقايا المادة الحية التي ارجعت بعمليات فساد أدت إلى تشكيل مواد يدخل فيها الكربون والهيدروجين كمركبات رئيسة. ويترابط هذان العنصران في أنماط عديدة من التراكيب الكيميائية التي ينتج منها ما يسمى بالفحوم الهيدروجينية. وإن التمييز بين أنواع تلك الفحوم الهيدروجينية يعتمد على عدد ذرات الكربون التي تحتويها. فحين تتحد ذرة من الكربون مع أربع ذرات من الهيدروجين يتشكل مركب يدعى بالميتان Methane ($CH_4$)، وتتحدد ذرتان من الكربون مع ست ذرات من الهيدروجين يتشكل مركب الايتان $C_2H_6$. وإن مختلف الفحوم الهيدروجينية التي تفصل بالتقطير على شكل مشتقات بترولية يمكن ادراجها وفق الجدول التالي:

| المشتق | | درجة الغليان (فرنهايت) | عدد ذرات الكربون |
|---|---|---|---|
| الغاز | Gas | تحت ٩٠ | ١-٤ |
| الغازولين | Gasoline | ١٠٠-٤٠٠ | ٤-١٢ |
| النافتا | Naphta | ١٢٥-٤٠٠ | ٧-١٢ |

| | | | |
|---|---|---|---|
| الكيروسين (زيت الكاز) | Kerosine | ٤٠٠-٦٠٠ | ١٢-١٥ |
| زيت الوقود (المازوت) | Fuel oil | ٤٠٠-٧٠٠ | ١٥-١٨ |
| زيت التشحيم | Lubricating oil | فوق ٦٥٠ | ١٦-٢٠ |
| الشحم | Petrolatum | فوق ٦٥٠ | ١٨-٢٢ |
| الشمع | Wax | الانصهار ١٢٥-١٣٠ | ٢٠-٣٤ |
| الاسفلت | Asphalt | بقايا | |

تحتوي التوضعات الطبيعية للبترول على الكثير من أنواع الفحوم الهيدروجينية مختلطة مع بعضها. وتفصل عن بعضها بالتقطير المجزأ الذي يعتمد على كون المركبات الخفيفة تتبخر بصورة أسرع من المركبات الثقيلة.

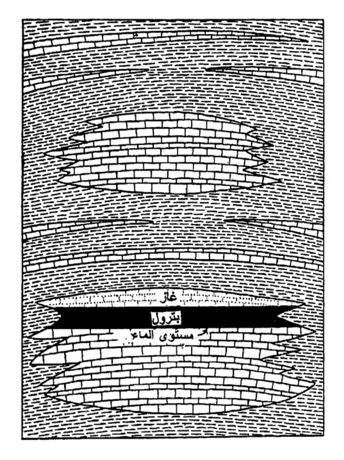
**طبقات المصدر Source beds**: تتطور معظم المواد البترولية والغازية بدءاً من بقايا عضوية، كانت قد ترسبت بالأصل في بيئات ترسيب بحرية. وهنالك مثال عن هذه البيئات موجود حالياً وهو البحر الأسود، حيث يتحرك الماء فيه ببطء شديد وتحتوي رسوبات القاع على ما يقرب من ٣٥٪ من المادة العضوية، اذ يقابلها في البيئات البحرية الأخرى ٢,٥٪ فقط. وحين يحصل فساد المادة العضوية في بيئة من هذا النوع تتشكل أوحال عضوية سوداء لزجة تعرف بالسابروبيل Sapropel. ويعتقد أن مواد البترول والغاز الطبيعي تتطور بدءاً من السابروبيل الذي يخضع لسلسلة من التحولات، التي تشبه تحولات التورب نحو الفحم الحجري. وحتى تتم هذه التحولات يجب أن تتوافر ثلاثة شروط أساسية وهي:

١ـ طبقات مصدر يمكن أن تتشكل فيها الفحوم الهيدروجينية.

٢ـ طبقة نفوذة خازنة يمكن أن تهاجر اليها هذه الفحوم الناتجة.

٣ـ موقع مناسب في الطبقة الخازنة يمكن أن تحتجز فيها هذه المواد وهو ما يسمى المصيدة trap.

ويعتقد أن طبقات المصدر الأكثر أهمية هي طبقات الغضار الصفحي البحري، مع أن بعض أنواع الصخور الكلسية وبخاصة الرصيفية يمكن أن تلعب دور صخور مصدر. كما يوجد طبقات واسعة من الغضار الصفحي تشكلت في بيئات ترسيب مياه عذبة، مثل رسوبات الايوسين البحيرية في ولايات يوتا Utah والكولورادو ويومينغ Wyoming التي أعطت من ٥-١٠ غالونات من البترول في الطن الواحد، وهي تعرف باسم الغضار الصفحي الزيتي oil shales وتشكل مخزوناً مهماً للوقود.

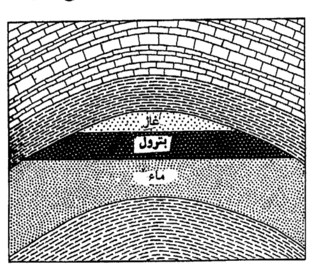



شكل ١٢-١: مصيدة بترول وغاز طبيعي في تشكيله رصيفية مرجانية قديمة محاطة بغضار صفحي كتيم.

**مواقع الطبقات الخازنة:** يعتمد موقع مخزون البترول والغاز الطبيعي على القوانين التي تتحكم في هجرة هذه المواد إلى الصخور الخازنة. ولسوء الحظ لا يمكن حتى الآن فهم طبيعة هذه القوانين، مع أن العديد من العلاقات التجريبية قد

الآن فهم طبيعة هذه القوانين، مع أن العديد من العلاقات التجريبية قد وضعت في هذا المجال.

ويبدو ببساطة أن الثقالة يمكن أن تفسر تمركز الكثير من الحقول البترولية. وطبقاً لنظرية الثقالة، فإن البترول والغاز الطبيعي والماء حين توجد في طبقة خازنة، يمكن أن تترتب فوق بعضها تبعاً لتباين أوزانها النوعية بحيث يقع الغاز في الأجزاء العلوية. وحين يحتجز المخزون في محدب أو قبة تحت تشكيلات كتيمة، فإن مواد البترول والغاز الطبيعي تتجمع على امتداد قمة المحدب أو القبة (شكل ١٢ــ٢ و١٢ــ٣). وان نظرية التجمع في المحدب ما هي إلا مظهر من مظاهر نظرية الثقالة، وقد أثبتت جدواها عند المنقبين حيث قادتهم إلى الحصول على انتاج هائل من البترول.

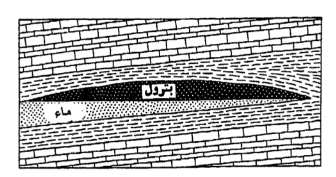



**شكل ١٢-٢: مصيدة بترول وغاز طبيعي في داخل تشكيلة نفوذة ذي بنية محدبة.**

ويؤخذ على نظرية الثقالة الحالات التي لا يترافق فيها الماء مع البترول والغاز الطبيعي، بحيث يتجمع البترول في منخفض المقعر ويعلوه الغاز الطبيعي، وإن وجود مخازن بترولية من هذا النمط قاد إلى انتقادات للطرائق الجيولوجية التنقيبية التي تعتمد على نظرية التجمع في المحدب.

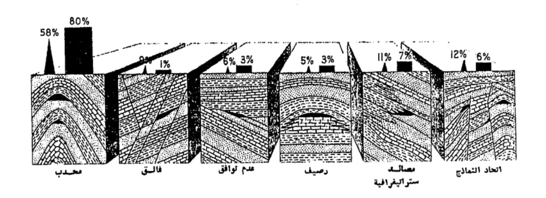
هنالك بنية أخرى مهمة في النظرية الثقالية وهي المصيدة الستراتيغرافية Stratigraphic trap التي تتشكل حين يحتجز البترول والغاز الطبيعي بنطاق من

الصخور ضعيفة النفوذية نتيجة لهجرته الصاعدة.




شكل ١٢-٣: مصيدة ستراتيغرافية للبترول على امتداد خط شاطئي قديم

وان هذه الوضعية يمكن أن تتطور مثلاً على امتداد خط شاطئ قديم أو في حواجز رملية قديمة، حيث تتغير السحنة باتجاه أفقي من الرمل إلى الغضار، أو حين تتعرض حركة البترول والغاز الطبيعي ضمن صخور خازنة نفوذة طبقة كتيمة عند مستوى عدم توافق أو نتيجة لفالق (شكل ١٢-٤).




شكل ١٢-٤: نماذج مختلفة للمصائد البترولية.

## طرائق استكشاف البترول والغاز الطبيعي

نظراً لكون تراكيز البترول والغاز الطبيعي تتطور ضمن رسوبات بحرية سميكة،

لذلك فإن المنقبين يقتصرون تحرياتهم على تشكيلات الصخور الرسوبية. وقد استخدمت طرائق عديدة في هذا المجال تتضمن (١) حفراً آلياً (٢) تنقيباً اهتزازياً (٣) تنقيباً ثقالياً.

تتم طريقة التنقيب الأولى بحفر عدة آبار متقاربة للاستدلال على بنية وتركيب الصخور الرسوبية تحت السطحية والتوصل إلى وضع خرائط لمجمل البنيات العميقة. أما التنقيب الاهتزازي فقد بني على خصائص موجات الهزات الأرضية. حيث يستخدم انفجارات ديناميت صغيرة ضمن حفر بعمق نحو ٥٠ قدماً ومنها تسجل سرعة الموجات الاهتزازية حسب طبيعة الصخور التي تخترقها. ومن خلال سلسلة هذه العمليات يمكن التعرف على البنية الكاملة تحت السطحية. أما مجال التنقيب الثقالي فيعتمد على تباين الوزن النوعي لتشكيلات الصخور الرسوبية. فإذا كانت طبقة رسوبية تقع تحت السطح في وضعية أفقية، فإن أجهزة قياس الثقالة الحساسة تعطي قراءة ثابتة لقوة الثقالة، على طول واتساع هذه الطبقة. ولكن حين تتغير وضعية هذه الطبقة فإن قراءات مقياس الثقالة تعكس التغيرات لهذه الطبقة. وعندما تدل القراءات على محدب أو فالق أو بنية أخرى يمكن أن تتجمع فيها المواد البترولية، فإن تنفيذ حفر الآبار الآلي الاختباري يجب أن يتم للكشف عن وجود هذه المواد أو عدمه.

## احتياطي البترول والغاز

لقد الاحتياطي العالمي في البترول نحو ٦١٠ بليون برميل.

## مصادر الطاقة في المستقبل:

يمكن القول أن الطاقة الذرية ستكون أكبر مصادر الطاقة في المستقبل. فالطاقة الصادرة عن الفحم والبترول والغاز تتمثل بطاقة كيميائية مختزنة في الكترونات الذرات، بينما يحرر الوقود الذري كميات كبيرة من الطاقة المحتبسة في نواة الذرة. وبما أن هنالك علاقة متبادلة بين الكتلة والطاقة، فنواة الذرة تحتوي على ٩٩,٩٥٪ من كتلتها وبالتالي كامل الطاقة. وفي الواقع حين تدخل نواة الذرة بتفاعل تسلسلي

تحرر طاقة أكبر بملايين المرات من الطاقة المتحررة بالتفاعل الكيميائي.

**الطاقة الذرية Atomic energy:** إن الطاقة الذرية المختزنة موجودة فقط في عدد قليل من العناصر منها اليورانيوم، وهو عنصر غير ثابت طبيعياً، وقد اكتشف لأول مرة عام ١٩٣٨، إنه عندما يكتسب نظير اليورانيوم U 235 نيتروناً يعطي U 236، وهذا الأخير ينشطر مباشرة إلى عنصرين خفيفين، ويتحرر نتيجة هذا الانشطار عدد من النيترونات ترافقها كميات ضخمة من الطاقة. فالنيترونات المتحررة تضرب نواة الـ U 235 وتحوله إلى U 236 وهكذا ينتج سلسلة من التفاعلات وكميات هائلة من الطاقة.

إن هذا النوع من التفاعل الذري قد استخدم على مقياس واسع في أول قنبلة ذرية عام ١٩٤٥. وفي الواقع تستخدم الطاقة النووية الآن لتسيير الغواصات وتوليد الطاقة الكهربائية. وسوف تستعمل في المستقبل القريب في تسيير الطائرات.

**خامات اليورانيوم:** يعود منشأ توضعات اليورانيوم إلى النشاط الناري حيث يوجد في الصخور النارية البغماتيتية وفي توضعات العروق. وإن أول خامات اليورانيوم هو فلز اليورانينيت Uraninite وهو معقد اكسيدي ويعرف أحياناً باسم بتشبلاند Pitchblende، وهنالك أيضاً معقد اكسيدي آخر هو الكارنوتيت، وهو فلز طري أصفر اللون يوجد في الحجر الرملي في سطيحة الكولورادو ويعد المصدر الرئيس لليورانيوم في الولايات المتحدة.

**طرائق استكشاف خامات اليورانيوم:** يتم التنقيب الأولي عن خامات اليورانيوم بواسطة عدد غايغر Geiger حيث يعطي صوتاً مميزاً عندما يمرر فوق أراض تحتوي على اليورانيوم.

**احتياطي اليورانيوم:** توجد معظم خامات اليورانيوم في العالم في توضعات بحيرة الدب الأكبر في كندا وفي الكونغو وفي تشيكوسلوفاكيا. ولكن الكميات المهمة منه توجد في الصخور الرسوبية كالحجر الرملي لسطيحة الكولورادو وفي الصخور التجمعية في وايت ووترسراند في أفريقيا.

يوجد اليورانيوم 235 بكميات محدودة جداً في العالم بينما يوجد اليورانيوم 238 بكميات أكثر بكثير، تقدر بـ ١٤٠ مرة، ولا يمكن استخدام النوع الأول مباشرة كوقود ذري.

أما احتياطي اليورانيوم بالطن فغير معروف تماماً، ولكن من المحتمل أن تكون الطاقة الكامنة في اليورانيوم الموجود في العالم يساوي احتياطي بمجموع احتياطي الطاقة من الفحم والبترول والغاز الطبيعي.

# المصادر الأجنبية


BATES, R. L., and others. 1973. *Geology: An Introduction* 2nd ed., D.C. Heath and Company. U.S.A.

DAVIS, S.N.,and others. 1976. *Geology: Our Physical Environment,* McGraw - Hill, Inc., N.Y.

FOSTER, R., and SKINNER, B.J. 1974. *Physical Geology* 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., N.Y.

FOSTER, R.J.1979. *Physical Geology* 3rd ed. Charles E. Merrill Publishing Company, Ohio.

GORSHKOV, G. and YAKUSHOVA, A. 1977. *Physical Geology.* Moscow: Mir Publisher.

HAMBLIN, W. K. and CHRISTIANSEN, E. H. 1995. *Earth Dynamic Systems*, 7th ed. Prentic - Hall, Englewood Cliffs, N.J.

HOLMES, A. 1984. *Principles of Physical Geology*, 3ed, ELBs / VNR (U.K.) Co. Ltd.

LEET, L. D. and JUDSON, S. 1965. *Physical Geology*, Prentic - Hall, Inc., Englewood Cliffss, N.J.

MALLORY, B. F. and CARGO, D. N. 1979. *Physical Geology*, McGrow - Hill, Inc. N.Y.

MONROE and WICANDER, 1992. *Physical Geology*, West Publishing Co., N. Y.

MONTGOMERY, C. W. 1987. *Physical Geology*, Wm. C. Brown Publishers, Iowa.

SKINNER, B. J. and PORTER, S. C. 1987. *Physical Geology* John Wiley & Sons. N. J.

SPENCER, E. W. 1983. *Physical Geology*, Addison - Wesley Publishing Company, Inc.

TARBUCK, E. G. and LUTGENS, F. K. 1984. *The Earth: An Introdution to Physical Geology*, Bell & Howell Co. Ohio.

THOMPSON, G. R. and TURK, J. 1995. *Earth Science and the Enviroment*, Saunders College Publishing. U.S.A.

# المصطلحات العلمية الجيولوجية
## الواردة في هذا الكتاب مرتبة حسب الأبجدية الانكليزية

## (A)

| | | |
|---|---|---|
| Ablation | ١٦٦ | إزالة |
| Abrasion | ١٠١ | بري أو سحج |
| Abyssal zone | ٢٥٤ | نطاق الأعماق السحيقة |
| Accumulation | ١٦٦ | تراكم |
| Acidic lava | ٣١٣ | لابا حامضية |
| Aeration zone | ١٢٢ | نطاق التهوية |
| African rift valley | ٣٦٢ | الوادي الانهدامي الأفريقي |
| Alder | ٢٧٨ | النشم |
| Aleutian islands | ٣٧٤ | جزر الوثيان |
| Algae | ٢٣٧ | أشنيات |
| Alkali soil | ١٤٧ | تربة قلوية |
| Alluvial fans | ١١٤ | مراوح لحقية |
| Alluvial soil | ٤٥ | تربة لحقية |
| Alluvium | ٩٥ | لحقيات |
| Angle of repose | ٥٢ | زاوية سكون |
| Anhydrite | ٢٧ | انهيدريت |
| Antarctica | ١٧٢ | قارة القطب الجنوبي |
| Antarctica archlpelago | ١٧٦ | أرخبيل القطب الجنوبي |
| Anthropogen | ٢٦٧ | ظهور الانسان |
| Anticline fold | ٣٥٠ | طي محدب |
| Aquifer layer | ١٢٢ | طبقة حاملة للماء |

| | | |
|---|---|---|
| Aquifer rocks | ١٣٣ | صخور حاملة للماء |
| Artesian well | ١٤٤ | بئر ارتوازي |
| Atomic energy | ٤١٤ | طاقة ذرية |
| Asymmetric fold | ٣٥٠ | طي غير متناظر |
| Atmosphere | ١٢ | الغلاف الجوي |
| Atolls | ٢٦٣ | جزر مرجانية |
| Avalanche | ١٨٢ | التَّيْهُورْ |
| Axial plane | ٣٤٦ | مستوى محوري |

## (B)

| | | |
|---|---|---|
| Baikal | ٣٦٢ | بحيرة بيكال |
| Bajada | ٢٠٧ | باهادا |
| Bar | ٣٥٥ | بار (وحدة ضغط) |
| Bar | ٨٧ | حاجز |
| Barchan | ٢٢١ | برخان |
| Barrier reefs | ٢٦٣ | أرصفة حاجزة |
| Base level | ٩٢ | مستوى القاعدة |
| Bathyal zone | ٢٥٤ | نطاق الأعماق |
| Bauxite | ٤٩ | بوكسيت |
| Bed load | ٢٠٨ | حمولة سريرية |
| Bedding joints | ٣٥٦ | فواصل تطبق |
| Bedding plane | ٣٤٥ | سطح التطبق |
| Bedrocks | ٤٥ | مهد صخري |
| Bedrocks features | ٣٧٤ | مظاهر صخرية |
| Benioff zone | ٣٠٢ | نطاق بينوف |

## (C)

## (D)

## (E)

| | | |
|---|---|---|
| Earthquake weather cock | ٢٩١ | ديك الطقس الزلزالي |
| Earthquakes intensIty | ٢٩٦ | شدة الزلازل |
| Echinoids | ٢٣٧ | قنفذانيات |
| Effluent streams | ١٢٦ | أنهار متأثرة |
| Elastic deformation | ٣٣٤ | تشوه مرن |
| Elastic limit | ٣٣٤ | حد المرونة |
| Elastic rebound theory | ٢٨٧ | نظرية الارتداد المرن |
| Eolian soil | ٤٥ | تربة هوائية |
| Epicenter | ٢٨٦ | مركز سطحي |
| Erie | ٨٥ | بحيرة ايريه |
| Erosion | ٢١٢ | حت |
| Erratic boulders | ١٩٥ | جلاميد تائهة |
| Erratic boulders trains | ١٩٥ | قافلة الجلاميد التائهة |
| Eskers sediments | ١٩٨ | رسوبات الاسكرز |
| Estuary | ١١٤ | خليج نهري |
| (Eugeosyncline) | ٣٨١ | رسوبات مياه عميقة في مقعر جيولجي |
| Evapotranspiration | ٧١ | تبخر نتحي |
| Exfoliation | ٣٣ | تقشر |

# (F)

| | | |
|---|---|---|
| Facies | ٢٥٨ | سحنة |
| Fan fold | ٣٥٢ | طية مروحية |
| Fault | ٣٥٩ | فالق |
| Fault block mountains | ٣٧٧ | جبال الكتل الفالقية |
| Fault breccia | ٣٧١ | بريش فالقي |

## (G)

## (I)

| | | |
|---|---|---|
| Ice bergs | ١٧٦ | جزر عائمة |
| Ice caps | ١٧١ | قبعات جليدية |
| Ice sheets | ١٧٢ | غطاءات جليدية |
| Ice shelves | ١٧٦ | رفوف جليدية |
| Icefall | ١٨٢ | شلال أو مسقط جليدي |
| Imaninate world | ٤١ | عالم الجماد |
| Immature soil | ٤٢ | تربة غير ناضجة |
| Indochina | ٣٧٩ | الهند الصينية |
| Inertia | ٢٠٩ | عطالة |
| Influent streams | ١٢٧ | أنهار مؤثرة |
| Intermediate belt | ١٢٣ | حزام متوسط |
| Intermediate zone | ١٢٤ | نطاق متوسط |
| Intermittent | ٧٤ | مجار متقطعة |
| Internal drainage | ٢٠٥ | جريان داخلي |
| Interplate volcanism | ٣٢٨ | بركنة داخل الصفائح |
| Invasion | ١٥٩ | اجتياح |
| Iselberg | ٢٠٧ | جزر جبلية |
| Isoclinal fold | ٣٥٢ | طية متساوية الميل |

## (J)

| | | |
|---|---|---|
| Juvenil water | ١٢١ | ماء البكر |

## (K)



## (L)

| | | |
|---|---|---|
| Littoral zone | ٢٥٤ | نطاق شاطئي |
| Local base level | ٩٢ | مستوى قاعدة محلي |
| Loess deposits | ٢٢٤ | رسوبات اللوس |
| Loess dolls | ٢٢٨ | دمى اللوس |
| Longitudinal profile | ٨٤ | بروفيل طولي |
| Low land bogs | ٢٧٨ | مستنقعات الأراضي المنخفضة |

# (M)

| | | |
|---|---|---|
| Magnitude | ٢٩٩ | مقدار |
| Marine soil | ٤٥ | تربة بحرية |
| Material | ٣٩٥ | مادة |
| Mature soil | ٤٢ | تربة ناضجة |
| Mature stage | ١١٦ | مرحلة النضج |
| Meander neck | ٨٩ | رقبة المنعطف |
| Meandering channels | ٨٨ | أقنية المنعطفات |
| Meanders | ٨٨ | منعطفات |
| Mechanical twinning | ٣٤٤ | فتل ميكانيكي |
| Mechanical wheathering | ١٥ | تجوية ميكانيكية |
| Medial morains | ١٩٤ | مورينات متوسطة |
| Mediterranean and trans-asiatic belt | ٣٠٣ | حزام البحر المتوسط وعبر آسيا |
| Mesotrofic | ٢٧٧ | متوسط التغذية |
| Metal | ٣٩٥ | معدن |
| Metasomatism | ١٥٥ | استعاضة |
| Meteoric water | ١٢١ | مياه جوية |
| Mineral | ٣٩٦ | فلز |

## (O)



## (P)

| | | |
|---|---|---|
| Rates of flow | ١٨٤ | معدلات التدفق |
| Recharge area | ١٤٥ | منطقة التغذية |
| Recrystallization | ١٦٤ | إعادة تبلور |
| Rectangular drainage | ٧٨ | تصريف نهري مستطيل أو متعامد |
| Recumbent fold | ٣٥٠ | طي مسطح |
| Regolith | ٤١ | ريغوليت |
| Regression | ٢٣٨ | إنسحاب |
| Replacement | ١٥٥ | إبدال |
| Residual | ٤١ | متبقي |
| Residual concentration deposits | ٤٠١ | توضعات التركيز المتبقي |
| Residual soil | ٤٥ | تربة متبقية |
| Reverse fault | ٣٦٣ | فالق عكسي |
| Richter scale | ٢٩٩ | مقياس ريختر |
| Ridges | ٢١٩ | حافات |
| Ripples | ٢١٩ | تموجات |
| Rochés moutonnées | ١٩١ | صخور غنمية |
| Rock avalanche | ٥٥ | تيهور صخري |
| Rodents | ٢١ | قوارض |
| Rolling | ٩٧ | دحرجة |
| Runoff water | ٧١ | مياه جارية |

# (S)

| | | |
|---|---|---|
| Saline - dome tectonics | ٣٥٤ | تكتونية القباب الملحية |
| Saltation | ٢٠٩ | قفز |

| | | |
|---|---|---|
| Star dune | ٢٢٣ | كثبان نجمية |
| Stones seas | ١٦ | بحار الحجارة |
| Stored energy | ٥٣ | طاقة مختزنة |
| Straight channels | ٨٧ | أقنية مستقيمة |
| Strain | ٣٣٥ | إجهاد |
| Strain rate | ٣٣٩ | معدل الإجهاد |
| Stratigraphic trap | ٤١١ | مصيدة ستراتيغرافية |
| Stratovolcanoes | ٣٢٠ | مخاريط بركانية طبقية |
| Stream erosion | ١٠١ | حت نهري |
| Stress | ٣٣٥ | جهد |
| Strike | ٣٤٥ | اتجاه |
| Strike - slip fault | ٣٦٥ | فالق اتجاه انزلاقي |
| Strike joint | ٢٥٦ | فاصل اتجاه |
| Structural geology | ٣٣٤ | جيولوجيا البنيوية |
| Subduction | ٣٨٢ | إنغراز |
| Subduction zone volcanism | ٣٢٧ | بركنة نطاق الإنغراز |
| Sublimates | ٣٢٥ | تصعدات |
| Subpolar glaciers | ١٧٨ | جليديات تحت قطبية |
| Subsidence | ٦٥ | انخساف |
| Subsoil | ٤٤ | تربة سفلية |
| Sudden shocks | ٦٨ | صدمات مفاجئة |
| Surf zone | ٢٤١ | نطاق التكسر |
| Surface soil | ٤٣ | تربة سطحية |
| Surface waves | ٢٩٠ | موجات سطحية |
| Suspended load | ٢١٠ | حمولة معلقة |
| Symmetrical fold | ٣٥٠ | طية متناظرة |

## (W)



## (Y)



## (Z)

# المحتويات

| الموضوعات | الصفحة |
| --- | --- |

**الفصل الثاني: تبدد الكتل**



**الفصل الثالث: المياه الجارية السطحية**

**الفصل الثامن: البحيرات والمستنقعات وأهميتها الجيولوجية**

# القسم الثاني

## العوامل الجيولوجية الداخلية




مطبعة طربين

رقم ٤١٨

طبع باشراف لجنة الانجاز

سعر المبيع للطالب ١٧٥ ل.س